

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra geotechniky

## **Stanovení charakteristik odpadů z rudných provozů**

Diplomová práce



Autor: Marek Bartoň

Vedoucí práce: Ing. Mgr. Jan Valenta, Ph.D.

Praha, 2017



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Bartoň</u>	Jméno: <u>Marek</u>	Osobní číslo: <u>396437</u>
Zadávací katedra: <u>K135 - Katedra geotechniky</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Konstrukce a dopravní stavby</u>		

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Stanovení charakteristik odpadů z rudních provozů</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>The ore waste characteristics assesment</u>	
Pokyny pro vypracování: Rešerše literatury horninových odpadů z rudních provozů Stanovení klíčových parametrů horninových odpadů pro ukládání na skládku laboratorní práce - na odebraných vzorcích provedení zkoušek pro stanovení klíčových parametrů - provedení triaxiálních zkoušek - provedení zkoušek stlačitelnosti - provedení základních indexových zkoušek - provedení sykových krabicových zkoušek - vyhodnocení chování odpadů z rudních provozů	
Seznam doporučené literatury: dle pokynů vedoucího práce	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Ing. Mgr. Jan Valenta, Ph.D.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>2.3.2017</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>21.5.2017</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)
-----------------------	---------------------

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Praze dne 18. 5. 2017

---

Podpis autora  
Marek Bartoň

## Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Mgr. Janu Valentovi, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování diplomové práce věnoval.

## Abstrakt

Tato diplomová práce se věnuje stanovení parametrů odpadních materiálů ze zpracování měděné rudy na odkališti lomu Erdenet v Mongolsku. V rámci diplomové práce bylo provedeno několik laboratorních zkoušek. Deformační parametry byly stanoveny edometrickými zkouškami, pevnostní parametry zkouškami v triaxiálním přístroji, v krabicovém smykovém přístroji a ověřeny zkouškou sypným úhlem. V práci jsou popsány technologické postupy jednotlivých zkoušek a je zde věnován prostor problematice vyhodnocování. Z výsledků těchto zkoušek byly vystaveny protokoly a stanoveny indexové, deformační a pevnostní charakteristiky odpadních materiálů.

## Klíčové slova

Odpadní materiál, rudný provoz, Erdenet, křivka zrnitosti, edometr, deformační parametry, triaxiální zkouška, krabicová zkouška, úhel vnitřního tření

## Abstract

This diploma thesis deals with determination of parameters of waste materials from copper ore processing. Several laboratory tests were carried out in the course of the thesis. Deformation parameters were determined by compressibility tests, strength parameters were determined by triaxial tests, shear box tests and pour tests. The thesis describes the technological procedures of the individual tests and the scope of results evaluation. The results of these tests were exposed to protocols. The particle size distribution curves, deformation and strength characteristics of the waste materials are also presented.

## Keywords

Tailings material, ore mining, Erdenet, particle size distribution curve, oedometer test, deforming properties, triaxial shear test, direct shear test, friction angle

# OBSAH

1. ÚVOD	7
2. CHARAKTER ODPADU Z RUDNÝCH PROVOZŮ – REŠERŠE	8
3. PROVEDENÉ ZKOUŠKY	9
3.1. Stanovení indexových vlastností	9
3.1.1. Postup zkoušky	9
3.1.2. Výsledky Indexových zkoušek	10
3.2. Zkouška stlačitelnosti	11
3.2.1. Postup zkoušky	11
3.2.2. Výsledky zkoušky stlačitelnosti na odebraných vzorcích	15
3.3. Triaxiální zkouška	20
3.3.1. Postup zkoušky	20
3.3.2. Problematika měření a vyhodnocování	24
3.3.3. Výsledky triaxiálních zkoušek	28
3.4. Krabicová smyková zkouška	35
3.4.1. Postup zkoušky	35
3.4.2. Výsledky zkoušek	36
3.5. Sypný úhel	38
3.5.1. Postup zkoušky	38
3.5.2. Výsledky zkoušek	39
4. ZÁVĚR	41
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	42
SEZNAM TABULEK	43
SEZNAM OBRÁZKŮ	44
SEZNAM PŘÍLOH	46

# 1. ÚVOD

Účelem práce je stanovení geotechnických parametrů odpadů z rudných provozů ložiska Erdenet a jejich využití pro stanovení stability odkaliště. Ložisko nese název podle města, v jehož blízkosti se nachází. Město Erdenet je druhé největší město Mongolska, leží na severu země (Obr. 1-1 ) a vzniklo po objevení významných zásob měděné rudy v této oblasti. Zásluhy na objevu tohoto ložiska nese tým československých geologů, který zde mapovali území v letech 1964 – 1968. [1]



Obr. 1-1 [2] Poloha odkaliště a města Erdenet

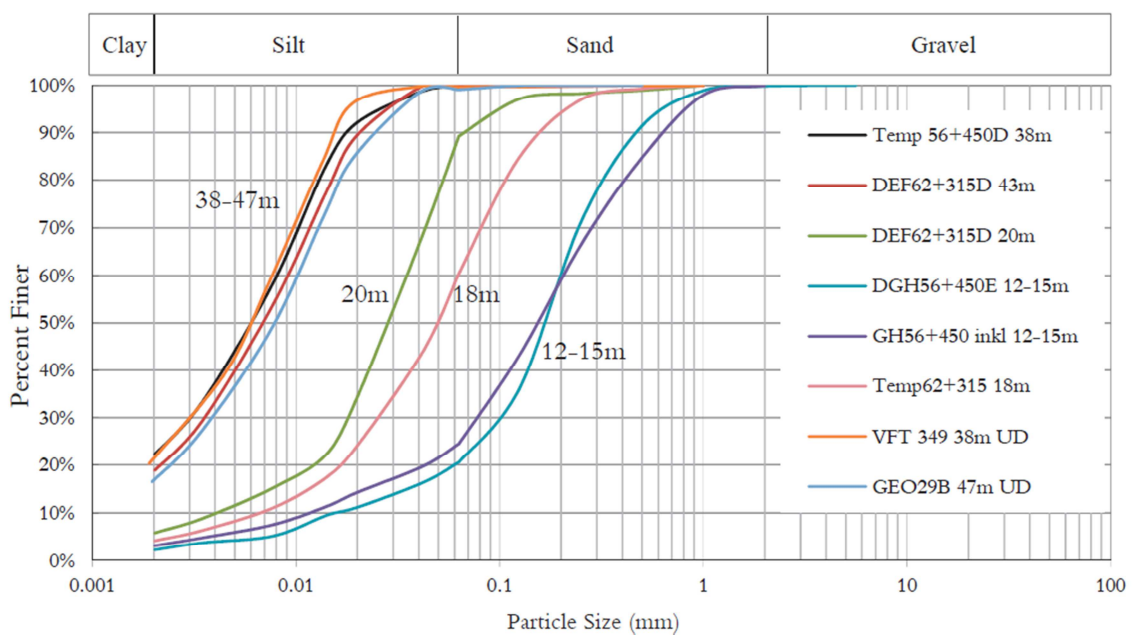
V rámci práce jsem hledal parametry podobných odpadů, které se stanovily na jiném odkališti ve světě.

Svou práci jsem vypracoval na základě podkladů a instrukcí, které jsem dostal od vedoucího diplomové práce. Jako podklady pro uskutečnění práce jsem dostal odebrané vzorky z vrtů provedených na odkališti.

Ze vzorků jsem stanovil indexové vlastnosti, deformační parametry zkouškami v edometru, pevnostní parametry zkouškou sypným úhlem, zkouškami v nepravém triaxiálním přístroji a pomocí krabicové smykové zkoušky. Postup jednotlivých zkoušek jsem popsal a doplnil fotografiemi. V práci jsem se věnoval také problémům, které vznikly při vyhodnocování triaxiálních zkoušek a byly způsobeny chybnými vzorci pro výpočet jednotlivých fyzikálních veličin v programu ovládajícím triaxiální přístroj.

## 2. CHARAKTER ODPADU Z RUDNÝCH PROVOZŮ – REŠERŠE

V rámci rešerše dostupných prací se stejnou problematikou jsem našel práci zabývající se zjištěním parametrů odpadů z výroby mědi ve Švédsku. Byl zde stanoven rozbor zrnitosti odpadních materiálů (Obr. 2-1). Pevnostní parametry zemin byly stanoveny z celkem 27 smykových zkoušek. Z toho 15 odvodněných a 12 neodvodněných. Výsledné parametry byly roztříděné v závislosti na hloubce odebrání daných vzorků (Tabulka 2-1). [3]



Obr. 2-1 Křivky zrnitosti materiálů z různé hloubky [3]

Sample Location	Depth from surface of Dam	$\varphi'$
GH Section	7-10m depth	39.1
EF Section	18-20m depth	41.1
EF Section	21-22m depth	40.2
GH Section	38-47m depth	39.7

Tabulka 2-1 Úhly vnitřního tření odebraných materiálů v různých hloubkách [3]



## 3. PROVEDENÉ ZKOUŠKY

### 3.1. Stanovení indexových vlastností

#### 3.1.1. Postup zkoušky

Mezi indexové vlastnosti patří zrnitostní rozbor, stanovení konzistenčních mezí, indexu plasticity, přirozené vlhkosti. Vzhledem k charakteru vzorku, jakož odpadního materiálu ze zpracování rudy, se některé zkoušky nedaly uskutečnit. Vzorek byl neplastický, takže nebylo možné stanovit meze plasticity a ani další vlastnosti jako index plasticity a stupeň konzistence, k jejichž stanovení je třeba znát hodnoty meze plasticity a tekutosti. Věnoval jsem se zejména stanovení zrnitosti a vlastností vyplívajících ze zrnitosti vzorku. Zrnitostní rozbor jsem dělal pomocí prosévání pro vzorky větší 0,063 mm. Pro zrna menší jsem doplnil rozbor hustoměrnou zkouškou.

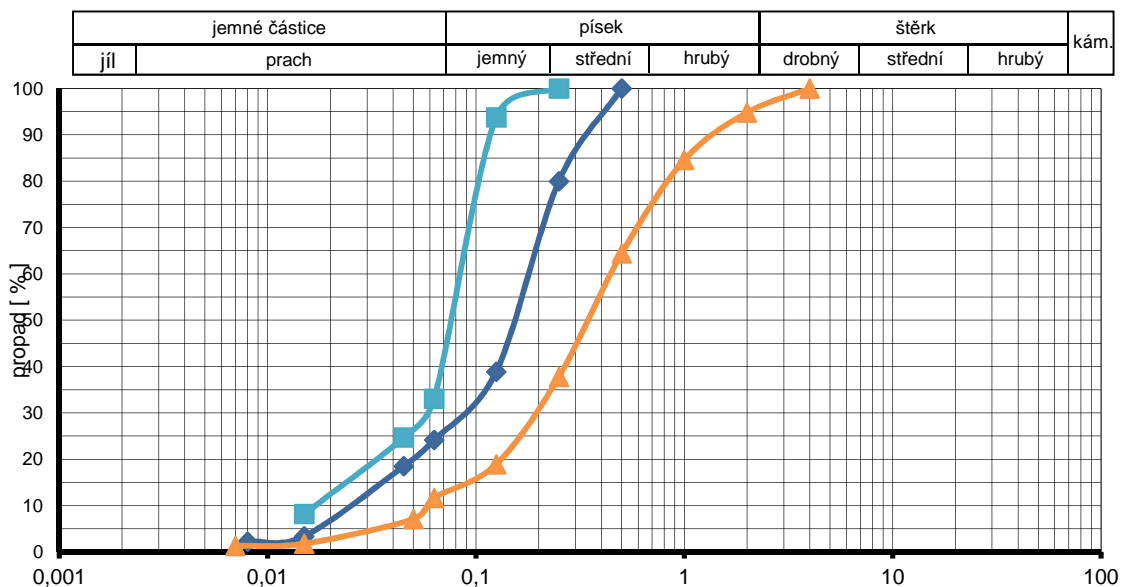
Při prosévání se roztřídí jednotlivé frakce vzorku pomocí kontrolních sít na jednotlivé frakce. Tyto frakce odpovídají velikosti ok těchto sít. Vzorek jsem ke zkoušce připravil tak, že jsem z celého množství odebral část vzorku pro hustoměrnou zkoušku a zbytek dal do nádoby, kterou jsem zalil vodou. Vzorek jsem nechal ve vodě do druhého dne. Následně jsem vzorek promyl vodou na sítích 0,063 mm a 0,2 mm. Při tomto procesu se odstraní částice menší než 0,063 mm, ze kterých bude rozbor stanoven hustoměrnou zkouškou. Promytý vzorek jsem dal poté do misky, kterou jsem si předem zvážil a hmotnost zapsal. Vzorek s miskou jsem umístil na 24 h do sušárny zemin. Po vyjmutí ze sušárny jsem vzorek opět ihned zvážil. Sestavil jsem sadu sít pro tuto zkoušku. Síta jsem důkladně zkontroloval, zda jsou nepoškozená a zda jsou ve správném pořadí za sebou. Pod poslední síto jsem umístil záchytnou misku. Sadu sít jsem umístil do mechanické prosévačky, vzorek vysypal z misky do nejvrchnějšího síta, přikryl toto síto pokličkou a pomocí šroubů zajistil sadu proti pohybu. Poté jsem zapnul prosévačku na 10 minut. Sadu sít jsem po prosetí odšrouboval a z přístroje vyjmul. Z každého síta jsem vysypal vzorek do misky a síto důsledně vyčistil kartáčkem, abych zamezil ztrátě zrníček vzorku, které se zaklínily v sítu dané frakce. Vzorek z každého síta jsem zvážil a po zvážení všech frakcí porovnal součet hmotností všech frakcí s hmotností celého vzorku před proséváním. Rozdíl mezi těmito hmotnostmi nesmí být víc než 1% původní hmotnosti, pokud tomu tak není, je třeba prosévání opakovat s novým vzorkem. Zkouška mi ve všech případech vyšla kladně.

Hustoměrnou zkoušku jsem provedl s částí vzorku odebranou před proséváním, která byla namočená v dispergačním roztoku. Takto připravený vzorek jsem přemístil na síto o velikosti 0,063 mm, pod kterým byla záchytná miska. Pomocí vody jsem vzorek prosel. Zůstatek na sítu jsem dal do předem zvážené mističky a dal vysušit do sušárny. Částice s vodou v záchytné misce jsem dal do odměrného válce o objemu 1000 ml. Chybějící vodu jsem doplnil přesně na rysku 1000 ml a odměrný válec umístil do vodní lázně, kde je konstantní teplota 22 °C. Další den jsem vzorek v odměrném válci důkladně několik minut promíchal a začal s měřením hustoty vzorku. Hustotu suspenze jsem měřil v intervalech 1 minuta, 2 minuty, 4 minuty, 6 minut, 10 minut, 30 minut, 60 minut, 4 hodiny, 8 hodin a 24 hodin.

### 3.1.2. Výsledky Indexových zkoušek

Zpracováním dat z prosévání a z hustoměrné zkoušky jsem vynesl u všech 3 vzorků křivky zrnitosti (Obr. 3-1). Křivka zrnitosti je součtová čára sestavená z procenta propadů na jednotlivých sítích. Vodorovná osa odpovídající průměru zrn se zobrazuje v logaritmickém měřítku. Křivka zrnitosti slouží především k zatřídění zemin, ale podle tvaru křivky je možné také posoudit propustnost zemin nebo namrzavost zemin. Z průměru zrn při 10, 30 a 60 procentním zastoupení se dá vypočítat číslo nestejnozrnnosti a číslo křivosti, které daný vzorek a křivku částečně charakterizují. Tyto hodnoty jsem spolu s křivkou zrnitosti, zatříděním vzorku a přirozenou vlhkostí uvedl v protokolech o zkoušce (Příloha 1. 1., 1.2., 1.3.).

Sestavení křivky zrnitosti ze síťového rozboru spočívá z přepočítání hmotnosti jednotlivých frakcí na procento z celkové hmotnosti vzorku. Takto získáme křivku do hodnoty 0,063 mm. Na doplnění křivky se využije hustoměrné zkoušky. Z této zkoušky se ale získá pouze teplota suspenze, čas intervalů měření a hodnota hustoty naměřená v jednotlivých intervalech. Abych získal z těchto údajů průměr zrna odpovídající frakci, využil jsem Cassagrandeho nomogram, pomocí kterého jsem z již vzpomínaných hodnot tento průměr určil. Nomogram je sestavený na základě Stokesova zákona, který popisuje rychlost sedimentace vzhledem k velikosti a hmotnosti zrn.



Obr. 3-1 Křivky zrnitosti vzorků

## 3.2. Zkouška stlačitelnosti

### 3.2.1. Postup zkoušky

Zkouška stlačitelnosti v edometru slouží pro stanovení deformačních parametrů zemin. Tyto parametry se využívají při posouzení druhého mezního stavu, nebo jako parametry různých materiálových modelů.

Funkce edometru odpovídá jednoosé deformaci. Aby k vodorovným deformacím nedocházelo, je vzorek zeminy vložen do nerezového prstence. Vnesení napětí je možné pouze posunem pístu o průměru rovnému vnitřnímu průměru prstence. Závislost mezi svislým zatížením a svislou deformací v případě jednoosé deformace popisuje podle teorie pružnosti edometrický modul.

Závislost deformace na napětí v prostoru popisuje rozšířený Hookův zákon:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y - \nu\sigma_z)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}(-\nu\sigma_x + \sigma_y - \nu\sigma_z)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}(-\nu\sigma_x - \nu\sigma_y + \sigma_z)$$

Kde:  $E$  – Youngův modul pružnosti

$\nu$  – Poissonovo číslo příčné kontrakce

$\varepsilon$  – Poměrná osová deformace

$\sigma$  – Normálové napětí

V našem případě, kdy dochází pouze k jednoosé deformaci, je nenulová jen svislá složka osově poměrné deformace ( $\varepsilon_z \neq 0$ ;  $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$ ). Vzniklá normálová napětí jsou nenulová ve všech směrech, a však napětí ve vodorovné rovině jsou si rovna ( $\sigma_x = \sigma_y \neq 0$ ). Pokud dosadíme tyto podmínky do Hookova zákona, získáme vztahy platící pro vzorek v edometru:

$$0 = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_x - \nu\sigma_z)$$

$$0 = \frac{1}{E}(-\nu\sigma_x + \sigma_x - \nu\sigma_z)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}(-\nu\sigma_x - \nu\sigma_x + \sigma_z)$$

Vztah mezi svislým a vodorovným napětím:

$$0 = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_x - \nu\sigma_z)$$

$$\sigma_x(1 - \nu) = \nu\sigma_z$$

$$\sigma_x = \sigma_z \cdot \frac{\nu}{(1-\nu)}$$

Vztah mezi svislým napětím a svislou deformací:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}(-2\nu\sigma_x + \sigma_z)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}\left(-2\nu\frac{\nu}{(1-\nu)}\sigma_z + \sigma_z\right)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}\left(1 - \frac{2\nu^2}{(1-\nu)}\right)\sigma_z$$

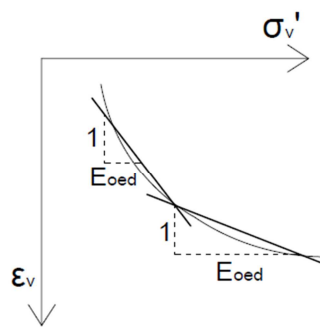
$$E = \left(1 - \frac{2\nu^2}{(1-\nu)}\right)\frac{\sigma_z}{\varepsilon_z} = \beta \cdot E_{oed}$$

$$\beta = 1 - \frac{2\nu^2}{(1-\nu)}$$

Kde:  $E_{oed}$  – Edometrický modul

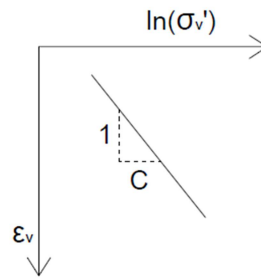
$\beta$  – součinitel popisující vztah mezi Youngovým modulem pružnosti a edometrickým modulem

Průběh deformace v závislosti na napětí je nelineární, z tohoto důvodu se edometrický modul v průběhu změny zatížení mění a není to konstanta (Obr. 3-2). Se vzrůstajícím napětím se zvětšuje, je nutné ho tedy vždy uvádět vzhledem k intervalu napětí, pro který platí.



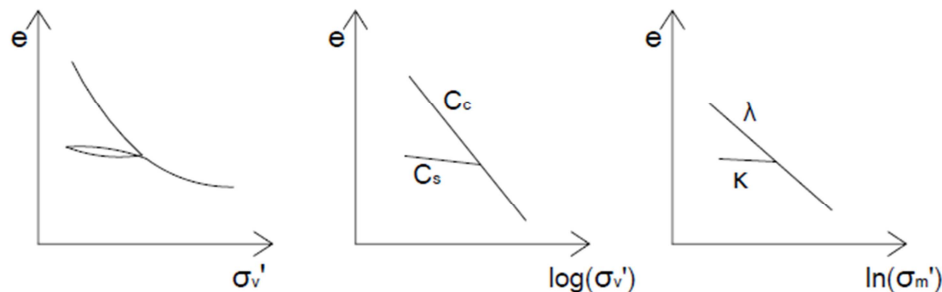
Obr. 3-2 Edometrický modul

Pokud průběh zkoušky znázorníme v semilogaritmickém měřítku, bude odpovídat přímkou. V tomto případě můžeme závislost znázornit jedním číslem, směrnici přímky. V zobrazení  $\ln(\sigma_v')$  :  $\varepsilon_v$  převrácenou hodnotou směrnice přímky a toto číslo se nazývá součinitel stlačitelnosti (Obr. 3-3).



Obr. 3-3 Součinitel stlačitelnosti

Existují i jiné součinitele a indexy, které takto popisují chování. Liší se tím, vzhledem k jaké veličině popisují změnu napětí a jaký základ logaritmu v semilogaritmickém měřítku používají. Ke stlačení zemin dochází v důsledku zmenšení objemu pórů, proto některé součinitele vyjadřují závislost napětí, vynesené v semilogaritmickém měřítku, na změně čísla pórovitosti (Obr. 3-4).



Obr. 3-4 Závislost napětí na čísle pórovitosti

$C_c$  – index stlačitelnosti

$C_s$  – index stlačitelnosti pro odlehčení

$\lambda, \kappa$  – parametry izotropní stlačitelnosti

Parametry  $\lambda$  a  $\kappa$  jsou parametry izotropní stlačitelnosti. Stanovují se ze zkoušky izotropního stlačení v triaxiálním přístroji. Rozdíl oproti zkoušce izotropní stlačitelnosti je v poloze čáry normálního stlačení, ale sklon čáry normálního stlačení a čáry odlehčení lze určit i ze zkoušky jednoosé stlačitelnosti pomocí indexů  $C_c$  a  $C_s$ . Platí zde vztahy  $\lambda = \frac{C_c}{2,303}$  a  $\kappa = \frac{C_s}{2,303}$ . [4]

Samotný postup zkoušky začíná přípravou vzorku. Edometr (Obr. 3-5), který jsem používal, měl prstenec o výšce 2 cm a ploše 40 cm<sup>2</sup>. Prstenec jsem co nejdokonaleji zaplnil vzorkem. Vzorek odpadu byl předtím vysušen a tím zbaven přetvárné a napjatostní historie. Prstenec se vzorkem jsem zvažil a pomocí hmotnosti vzorku a objemu prstence stanovil počáteční pórovitost. Prstenec jsem následně vložil mezi dva segmenty, které se vzájemně sešroubovaly. Nad a pod prstencem se nacházely filtrační destičky. Součástí vrchního segmentu je píst s aretací, která se uvolní až před začátkem zkoušky. Tyto segmenty se vzorkem jsem umístil do přístroje, který bude vyvozovat tlak na píst. Následně jsem připevnil digitální senzor deformace, který bude měřit zatlačení pístu do vzorku. Siloměr je součástí přístroje. Edometr je propojen pomocí kabelů s počítačem, kde je program, který řídí zkoušku podle námi zvoleného postupu.



Obr. 3-5 Edometr

Průběh zatěžování můžeme nastavit buď v závislosti na deformaci nebo na napětí. Pro zvolenou metodu se následně nastaví rychlost zatěžování (kPa/min nebo %/min). Já jsem použil zatěžování řízené změnou napětí. Pro jednu zkoušku jsem dále použil nastavení „Continuous“, což značí průběžné zatěžování dle zadané rychlosti až do konečné požadované hodnoty napětí. Po dosažení konečné velikosti napětí a po ustálení deformací je zatěžování ukončeno a lze vzorek pouze odlehčit. Odlehčení se zaznamená a získají se parametry odlehčovací větve. Další zkoušku jsem udělal s nastavením „Stepwise“, to znamená, že pro každý krok se nastaví hodnota napětí, které se má dosáhnout. Po dosažení této hodnoty se zkouška neukončí, ale program umožní uživateli nastavení dalšího kroku. Postupoval jsem tak, že po každé dosažené hodnotě zatížení jsem vzorek odtížil a vždy po ustálení deformací zatížil na další úroveň.

Přístroj přímo měří pouze svislou deformaci a sílu působící na píst, veličiny napětí a poměrnou deformaci sám vypočítává. Pro ověření jsem přepočítal ručně a ověřil, že záznam o zkoušce lze použít pro vyhodnocení.

Pro parametry  $C_c$ ,  $C_s$ ,  $\lambda$ ,  $\kappa$  bylo nutné stanovit průběh čísla pórovitosti. Pro výpočet jsem použil hodnotu hustoty pevných částic, stanovenou pyknometrem, a hmotnost vzorku v prstenci. Proměnná veličina je pouze objem vzorku, který se mění s deformací.

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 = \frac{\rho_s}{\frac{m_s}{V_i}} - 1$$

$\rho_s$  – hustota pevných částic

$\rho_d$  – objemová hmotnost suché zeminy

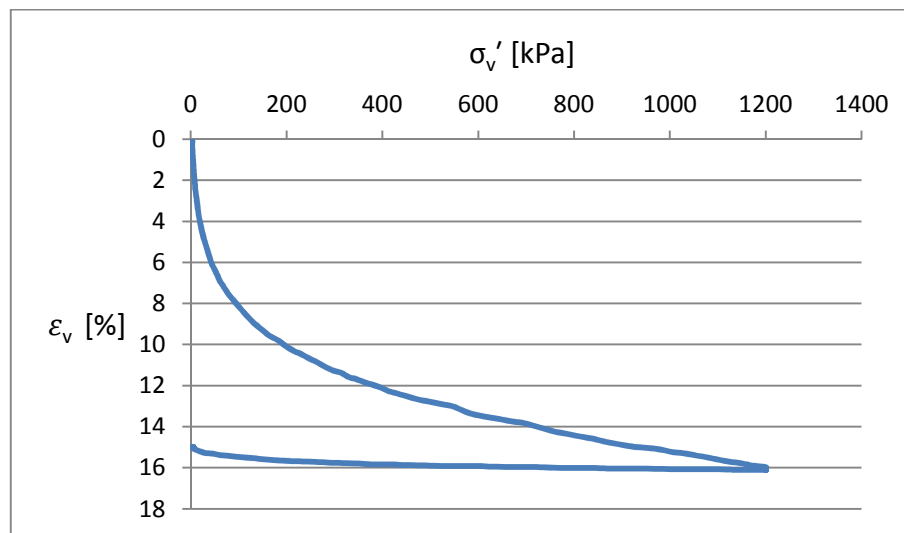
$m_s$  – hmotnost vzorku (skeletu)

$V_i$  – objem vzorku v průběhu zkoušky

### 3.2.2. Výsledky zkoušky stlačitelnosti na odebraných vzorcích

Jako první jsem provedl zkoušku na vzorku B3 z hloubky 45,0 – 45,3 m (Obr. 3-6). Pro tuto zkoušku jsem použil nastavení continuous a rychlost zatěžování/odtěžování nastavil na 1,1 kPa/min. Přístroj zaznamenával naměřené hodnoty každých 30 sekund prvních 10 minut, každých 5 minut do první hodiny a každých 15 minut po hodině trvání.

Pro stanovení edometrického modulu jsem průběh napětí rozdělil na několik intervalů, pro které jsem modul vyhodnotil. Intervaly jsem volil tak, aby se jednotlivé sečky co nejvíce blížily skutečnému průběhu (Tabulka 3-1).



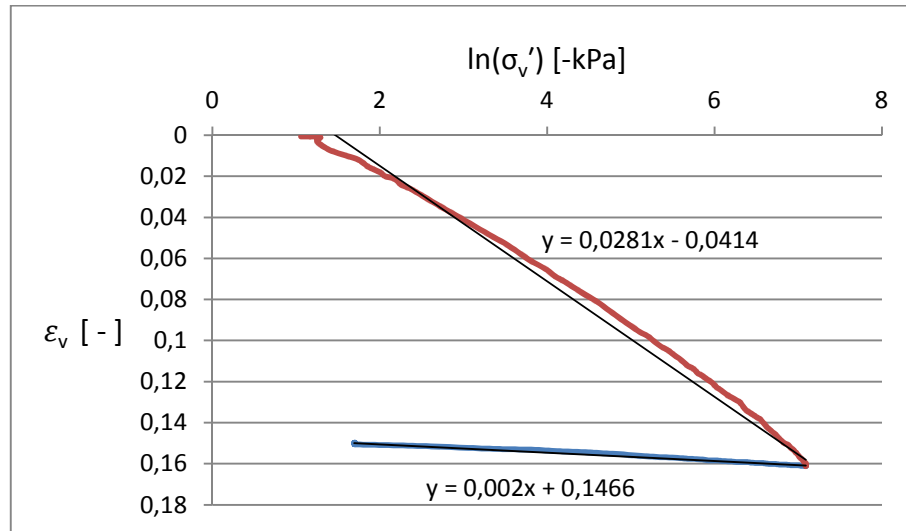
Obr. 3-6 Průběh zkoušky vzorku B3 45,0-45,3

Interval napětí	$\sigma'_v$ [kPa]	0-50	50-100	100-300	300-800	800-1200
Edometrický modul	$E_{\text{oed}}$ [MPa]	<b>0,78</b>	<b>2,89</b>	<b>6,27</b>	<b>16,02</b>	<b>25,29</b>

Tabulka 3-1 Edometrický modul pro intervaly napětí

Součinitel stlačitelnosti  $C$  jsem vyhodnotil ze zobrazení v semilogaritmickém měřítku (Obr. 3-7). Součinitel  $C$  je definován jako podíl změny logaritmu napětí a změny poměrného svislého přetvoření, proto se součinitel rovná převrácené hodnotě směrnice přímky.

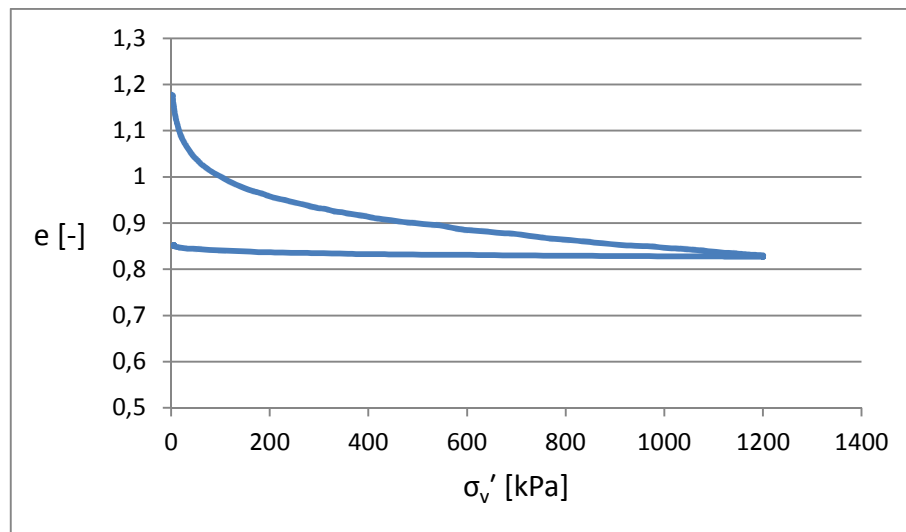
$$C = \frac{\Delta \ln(\sigma'_v)}{\Delta \varepsilon_v} = \frac{1}{0,0281} = 35,587$$



Obr. 3-7 Průběh zkoušky v zobrazení  $\ln(\sigma'_v):\varepsilon_v$

Z naměřených hodnot hustoty pevných částic a hmotnosti vzorku jsem vypočítal počáteční číslo pórovitosti. Průběh čísla pórovitosti je znázorněn grafem (Obr. 3-8).

$$e_0 = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 = \frac{\rho_s}{\frac{m_s}{V_0}} - 1 = \frac{2,73}{\frac{100,28}{80}} - 1 = 1,178$$



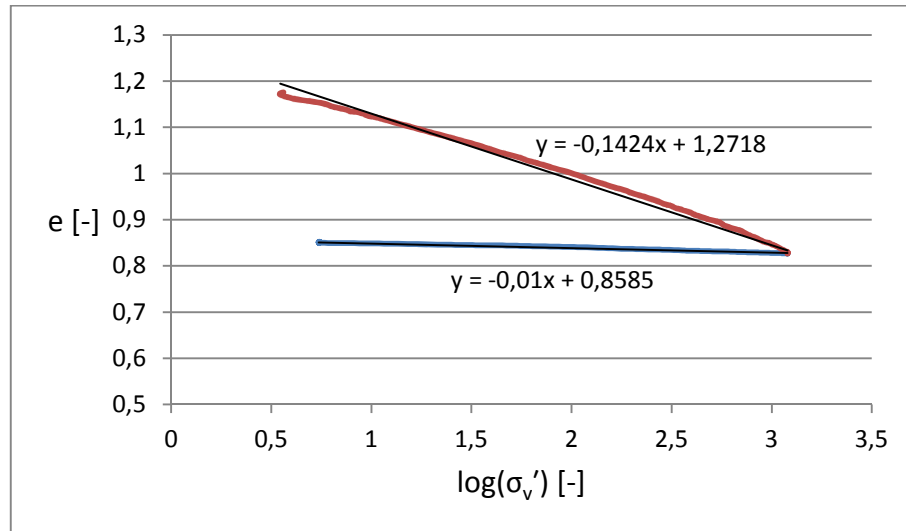
Obr. 3-8 Průběh čísla pórovitosti

Indexy stlačitelnosti pro zatěžovací i odlehčovací větve ( $C_c$ ,  $C_s$ ) jsem stanovil z průběhu čísla pórovitosti v zobrazení  $\log(\sigma'_v):e$  (Obr. 3-9).

$$C_c = -\frac{\Delta e}{\Delta \ln(\sigma'_v)} = -\frac{-0,1424}{1} = 0,1424$$

$$C_s = -\frac{\Delta e}{\Delta \ln(\sigma'_v)} = -\frac{-0,01}{1} = 0,01$$





Obr. 3-9 Průběh zkoušky v zobrazení  $\log(\sigma'_v):e$

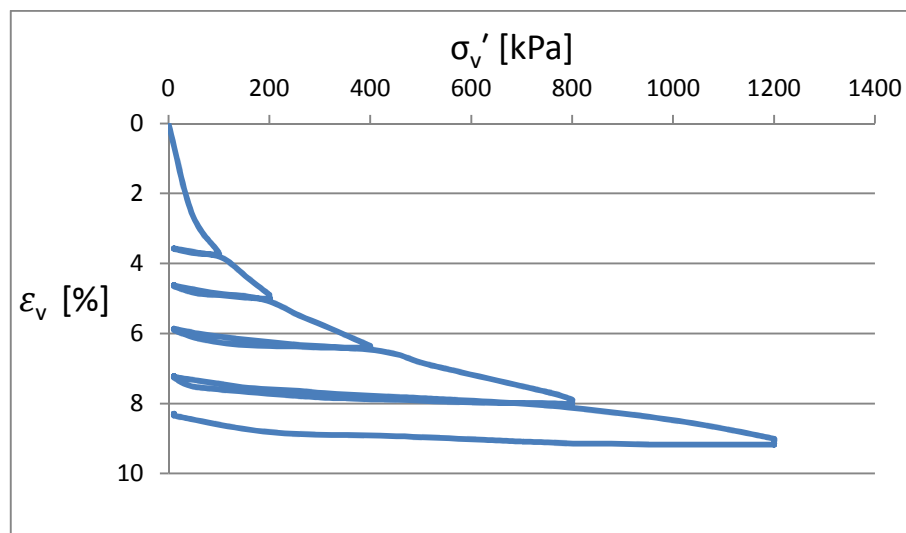
Z indexů  $C_c$ ,  $C_s$  jsem vypočítal parametry izotropní stlačitelnosti.

$$\lambda = \frac{C_c}{2,303} = \frac{0,1424}{2,303} = 0,0618$$

$$\kappa = \frac{C_s}{2,303} = \frac{0,01}{2,303} = 0,00434$$

Druhou zkoušku jsem provedl na vzorku B2 z hloubky 13,5 – 15,5 m (Obr. 3-10). Pro tuto zkoušku jsem použil nastavení stepwise a vzorek po každém kroku zatížení odtížil. Rychlost zatěžování/odtěžování byla 50,0 kPa/min. Přístroj zaznamenával naměřené hodnoty každých 60 sekund prvních 10 minut, každých 5 minut do první hodiny a každých 15 minut po hodině trvání.

Edometrický modul jsem stanovil pro stejné intervaly napětí jako v první zkoušce (Tabulka 3-2).



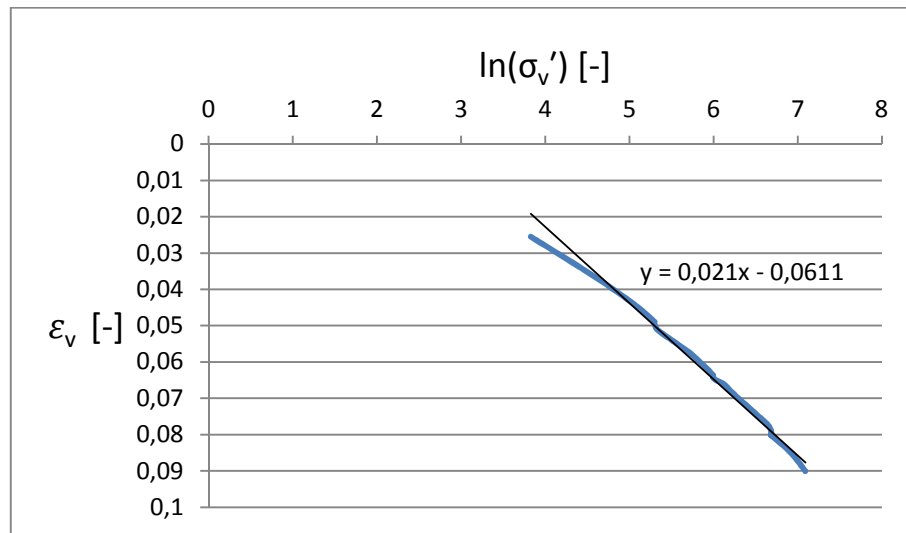
Obr. 3-10 Průběh zkoušky vzorku B2 13,5-15,5

Interval napětí	$\sigma'_v$ [kPa]	0-50	50-100	100-300	300-800	800-1200
Edometrický modul	$E_{oed}$ [MPa]	<b>1,80</b>	<b>4,59</b>	<b>10,16</b>	<b>21,93</b>	<b>34,00</b>

Tabulka 3-2 Edometrický modul pro intervaly napětí

Součinitel stlačitelnosti  $C$  (Obr. 3-11) :

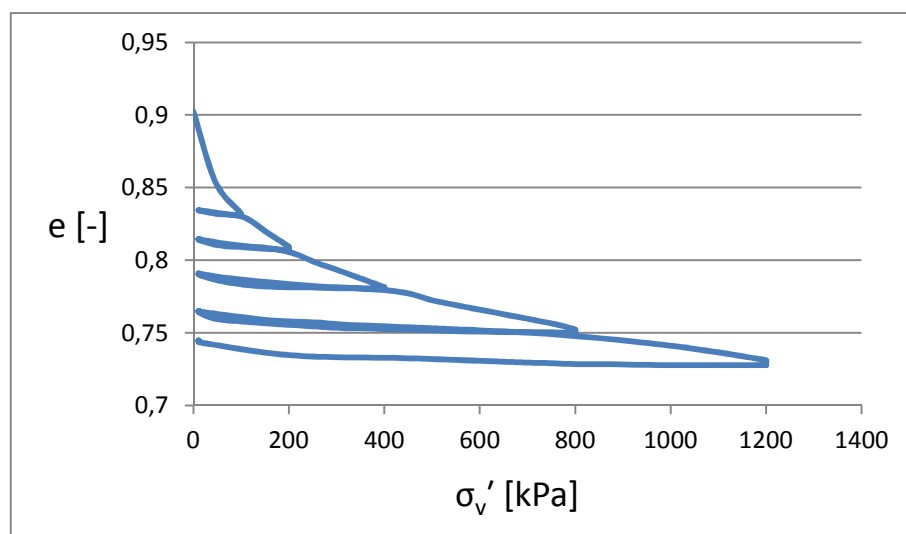
$$C = \frac{\Delta \ln(\sigma'_v)}{\Delta \varepsilon_v} = \frac{1}{0,021} = 47,619$$



Obr. 3-11 Průběh zatěžovací větve zkoušky v zobrazení  $\ln(\sigma'_v):\varepsilon_v$

Pro výpočet počátečního čísla pórovitosti jsem použil stejnou hodnotu hustoty pevných částic jako v první zkoušce. Průběh čísla pórovitosti je znázorněn grafem (Obr. 3-12).

$$e_0 = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 = \frac{\rho_s}{\frac{m_s}{V_0}} - 1 = \frac{2,73}{\frac{100,28}{80}} - 1 = 1,178$$

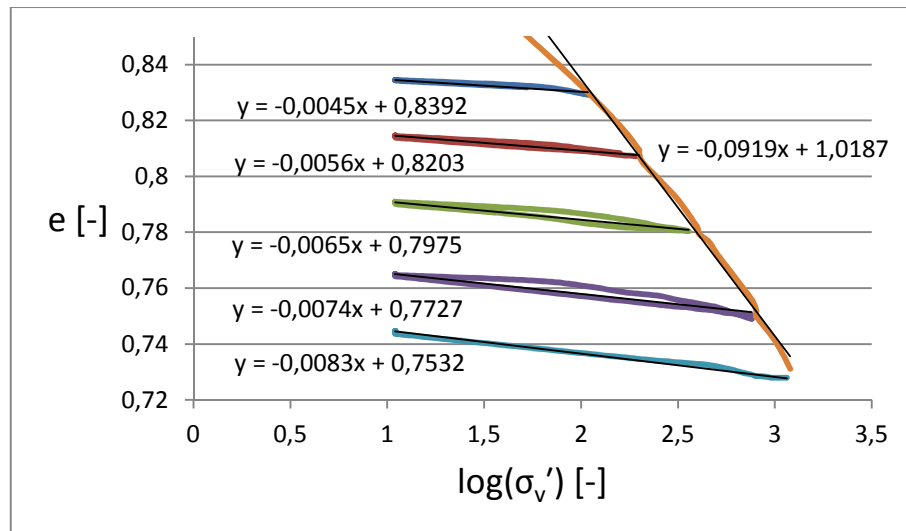


Obr. 3-12 Průběh čísla pórovitosti

Index stlačitelnosti  $C_c$  jsem stanovil z průběhu zatěžovací větve v zobrazení  $\log(\sigma_v')$ : $e$ . Index  $C_s$  jsem vyhodnotil jako aritmetický průměr indexů  $C_s$  jednotlivých odtěžovacích větví (Obr. 3-13).

$$C_c = -\frac{\Delta e}{\Delta \ln(\sigma_v')} = -\frac{-0,0919}{1} = 0,0919$$

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^5 C_{si}}{5} = 0,00646$$



Obr. 3-13 Průběh zkoušky v zobrazení  $\log(\sigma_v')$ : $e$

Z indexů  $C_c$ ,  $C_s$  jsem vypočítal parametry izotropní stlačitelnosti.

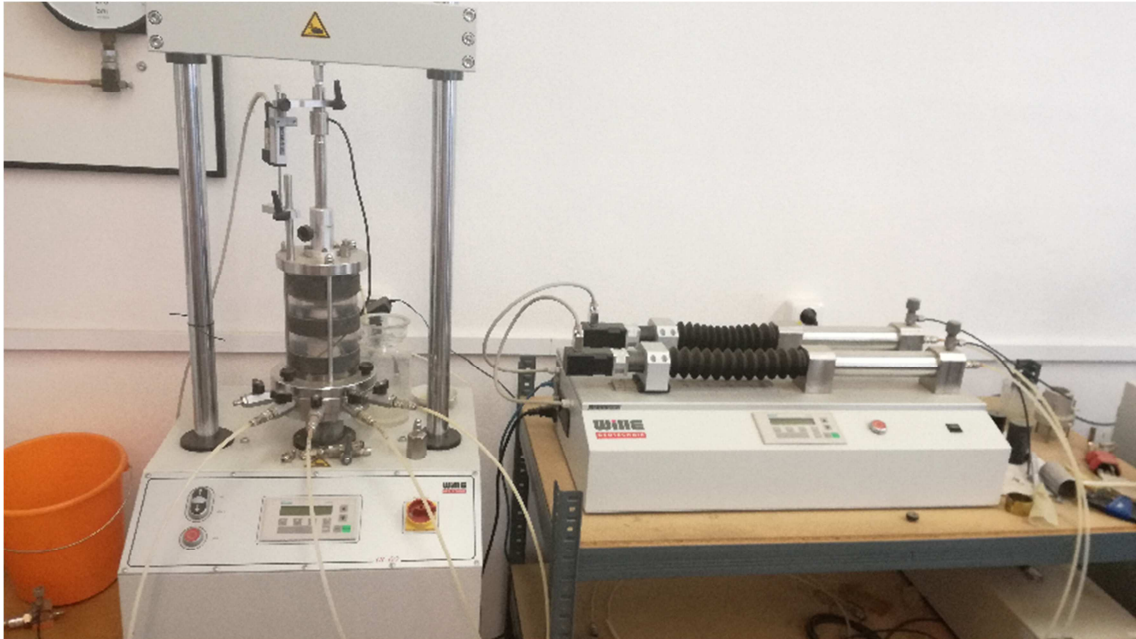
$$\lambda = \frac{C_c}{2,303} = \frac{0,0919}{2,303} = 0,0399$$

$$\kappa = \frac{C_s}{2,303} = \frac{0,00646}{2,303} = 0,0028$$

### 3.3. Triaxiální zkouška

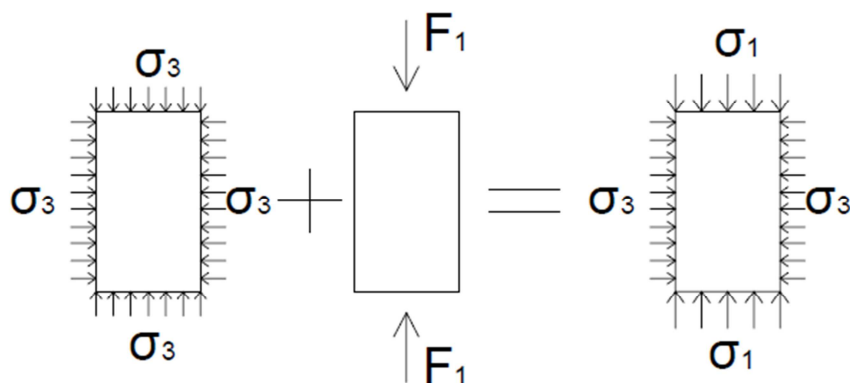
#### 3.3.1. Postup zkoušky

Zkouška v triaxiálním přístroji (Obr. 3-14) slouží pro získání pevnostních parametrů zemin. Tyto parametry se používají pro výpočty prvního mezního stavu, stability svahu, únosnosti základu atd. Parametry slouží také jako parametry numerických modelů.



Obr. 3-14 Triaxiální smykový přístroj

Stav napjatosti lze vždy rozdělit na hydrostatickou a deviatorickou část (Obr. 3-15). Hydrostatická část napětí způsobuje jen osové přetvoření, změnu objemu a žádné smykové přetvoření. Deviatorická část napětí má za následek smykové přetvoření a v případě zemin následné porušení vzorku dosažením smykové pevnosti. Pro popis napjatosti používáme střední hlavní napětí.



Obr. 3-15 Rozdělení napětí působícího na vzorek v triaxiálu

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$$

$p$  – střední hlavní napětí

Střední hlavní napětí je invariantem napětí, nezávisí na rotaci souřadného systému, při jakékoliv rotaci je střední hodnotou normálových napětí působících v daném bodě při dané napjatosti. V triaxiálu zatěžujeme vzorek jen pomocí normálových napětí, zatěžujeme jej tedy ve směru hlavních napětí. Napětí  $\sigma_2$  a  $\sigma_3$  působící ve vodorovné rovině jsou vyvozované komorovým tlakem, vzájemně se rovnají.

$$\sigma_2 = \sigma_3$$

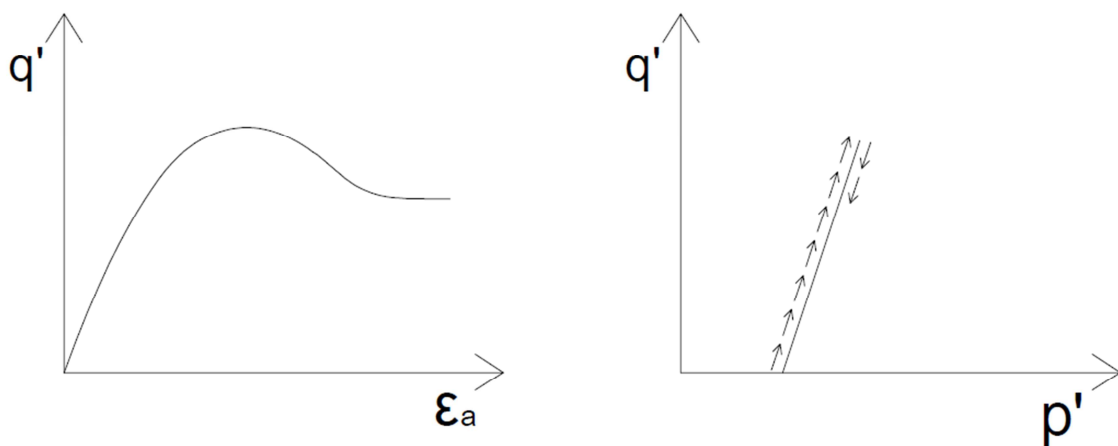
$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3)$$

Deviatorické napětí je vytvářeno pomocí pístu, který vzorek přitěžuje ve svislém směru. Pokud chceme deviatorické napětí stanovit je třeba od napětí působícího na vzorek ve svislém směru odečíst komorový tlak.

$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$q$  – deviatorické napětí

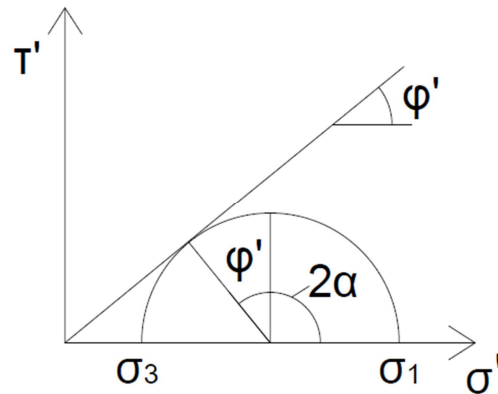
Závislost deviatorického napětí na osovém přetvoření (Obr. 3-16, vlevo) je jedním ze zobrazení, kterým lze charakterizovat průběh zkoušky v triaxiálním přístroji. Ke každé zkoušce jsem v protokolu tento průběh zobrazil spolu se zobrazením drah napětí, kterému odpovídá závislost deviatoru na středním hlavním napětí (Obr. 3-18, vpravo).



Obr. 3-16 Průběh zkoušky a dráhy napětí při odvodněné zkoušce

Vzorek zeminy se v průběhu zkoušky nejdříve chová tak, že spolu se zvyšujícím osovým přetvořením se zvyšuje také napětí, které je schopen vzorek přenést. Toto trvá až do momentu, kde nastává vrcholový stav, což znamená moment, od kterého zemina změkčuje až do ustálené minimální hodnoty, která se již s dalším narůstajícím osovým přetvořením nemění. Tento stav se nazývá kritický. Oběma stavům, které se v průběhu zkoušky vyskytují, odpovídají

pevnosti zemin, vrcholová pevnost a kritická pevnost. Tyto pevnosti jsou charakterizovány úhlem vnitřního tření ve vrcholovém a kritickém stavu. Pokud jednotlivé napjatostní stavy zobrazíme pomocí mohrovy kružnice (Obr. 3-17), můžeme úhel vnitřního tření spočítat pomocí geometrických vztahů.



Obr. 3-17 Mohrovo zobrazení napjatosti

Výpočet úhlu vnitřního tření:

$$\sin \varphi = \frac{\frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2}}{\frac{\sigma_3 + \sigma_1}{2}} = \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{\sigma_3 + \sigma_1}$$

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{\sigma_3 - \sigma_1}{\sigma_3 + \sigma_1}\right)$$

Zkoušky na odebraných vzorcích začínají přípravou vzorku. Nejprve jsem musel vzorek rozbít z obalu, který jej chránil před porušením při transportu a před únikem vlhkosti. Rozbalený vzorek jsem umístil do vykrajovače, který ze vzorku vykrojil váleček o průměru 38 mm, následně jsem upravil délku tohoto válečku, co nejlíže délce 76 mm. Vzorek jsem zvažil a hmotnost zaznamenal. Pomocí několika měření jsem změnil přesnou hodnotu průměru a výšky vzorku. Na spodní podstavu jsem umístil filtrační destičku a na ní postavil vyřezaný vzorek. Stejnou filtrační destičku jsem položil poté i na horní konec vzorku a přes takto připravený vzorek s destičkami nasadil gumovou membránu. Gumovou membránu jsem se spodní podstavou zajistil dvěma gumičkami, na horní filtrační destičku jsem položil vrchní podstavu a taktéž zajistil membránu gumičkami. Horní podstava je propojená hadičkami s ventily, které se nachází na spodní části a jsou propojené spojem, který je třeba dostatečně zkontrolovat (Obr. 3-18).



Obr. 3-18 Vzorek připravený na zkoušku a vzorek po zkoušce

Na takto připravenou spodní část se vzorkem jsem nasadil komoru, která je spojena se spodní částí třemi šrouby. Ve spoji se nachází těsnící gumička, kterou je třeba umýt a odstranit nečistoty, aby byl spoj dokonale vodotěsný. Na komoře jsem odaretoval píst a opatrně jej rukou posunul na kontakt s horní podstavou vzorku a takto znovu zaaretoval. Takto připravená komora se položí do přístroje a musí se naplnit vodou. Voda, která se používá pro plnění komory a vodních pístů, musí být předem zbavena vzduchu. K nádrži s vodou je připojena vývěva, která po zapnutí vytváří podtlak a vzduch z vody vyčerpá. Při plnění komory je třeba dbát na to, aby nikde nezůstaly bublinky a všechny hadičky a ventily je potřeba odvzdušnit. Stejně jsem postupoval i při plnění pump na vodu, které jsem naplnil a odvzdušnil. V této chvíli jsem připojil hadičky od pump na jednotlivé ventily, které propojovaly pumpy se vzorkem a s komorou. Nastavil jsem tlak v komoře na 50 kPa a ve vzorku na 30 kPa a zároveň nechal otevřený ventil ze vzorku. Tímto ventilem mohla protékat voda, odvzdušnily se hadičky a vzorek se sytil. Po protečení dvojnásobku objemu vzorku jsem sycení ukončil. Dále jsem použil triaxiál k měření propustnosti, jako propustoměr s konstantním spádem, a vyhodnotil součinitel propustnosti.

Propustoměr s konstantním spádem:

$$Q = A \cdot v \cdot t$$

$$v = k \cdot i$$

$$i = \frac{h}{L}$$

$Q$  – objem vody

$A$  – plocha vzorku, kterým protéká voda

$v$  – filtrační rychlost

$t$  – čas

$k$  – součinitel propustnosti

$i$  – hydraulický gradient

Součinitel propustnosti stanovíme ze vztahu:

$$k = \frac{v}{i} = \frac{Q \cdot L}{A \cdot h \cdot t}$$

$Q$  – změříme pomocí pumpy, kde uvidíme, jaký objem vody protekl

$L$  – délka vzorku, kterým voda protéká, změřili jsme při přípravě zkoušky

$A$  – plocha vzorku, stanovíme z průměru, který jsme změřili

$h$  – rozdíl hladin, při tlaku 30 kPa odpovídá 3 m

$t$  – měříme se stopkami

Po stanovení propustnosti jsem na komoru umístil senzory pro měření posunu, zkontroloval těsnosti všech hadiček a spustil na počítači program ovládající zkoušku. V tomto programu je třeba zadat rozměry vzorku a také se zde podobně jako u edometru nastavuje volba mezi zatěžováním napětím nebo deformací. Dále se nastaví rychlost tohoto zatěžování a maximální napětím v komoře, při kterém se zkouška ukončí. Já jsem používal zatěžování deformací a rychlost zkoušky volil podle doby sycení, čím byla delší, tím jsem volil pomalejší rychlost zatěžování.

Provedl jsem celkem 15 konsolidovaných odvodněných zkoušek odebraných materiálů.

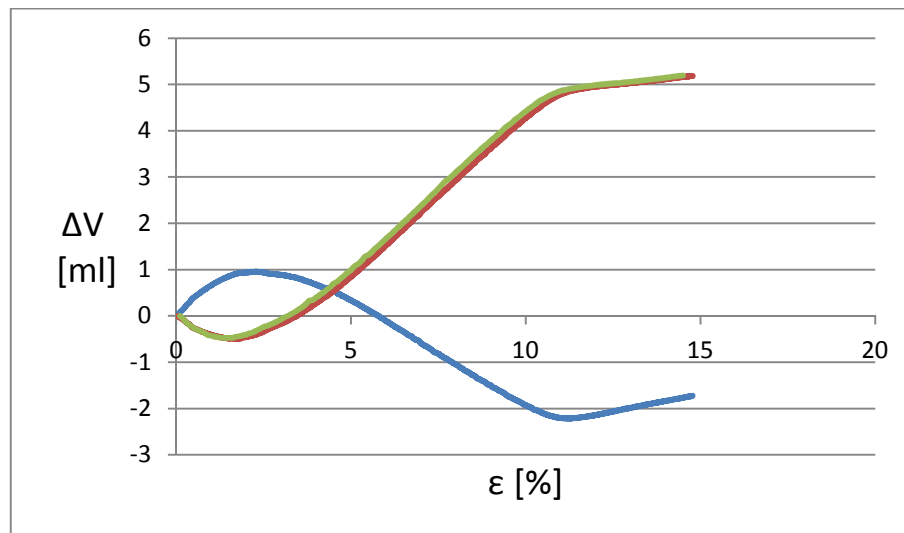
### 3.3.2. Problematika měření a vyhodnocování

Přístroj v průběhu zkoušky zaznamenává pouze některé veličiny a ostatní z nich vypočítává. Již v průběhu zkoušky se dají na monitoru nastavit grafy, které zobrazují aktuální průběh zkoušky ve zvolených jednotkách. Při pozorování těchto grafů jsem zaznamenal první nesrovnalost ve vyhodnocení objemových změn vzorku (volume change). Další problémy nastaly při výpočtu deviatorického napětí a změny plochy vzorku.



Při hledání příčiny špatných průběhů objemových změn jsem nejprve zkusil, zda nejsou zapojeny špatně hadičky od pump do komory a vzorku. Ani po jejich přehození ale průběh objemových změn neodpovídal teorii. Abych odhalil místo problému, uskutečnil jsem zkoušku, při které jsem manuálně odečítal hodnoty změn objemu, které zobrazují pumpy. Tyto hodnoty odpovídají skutečnosti, protože nejsou nijak vypočítané, ale jsou znázorněné přímo displejem pump. Odečítal jsem hodnoty každých 30 vteřin po dobu zkoušky 72 minut (na vzorku B4 22,1-22,5 200\_100).

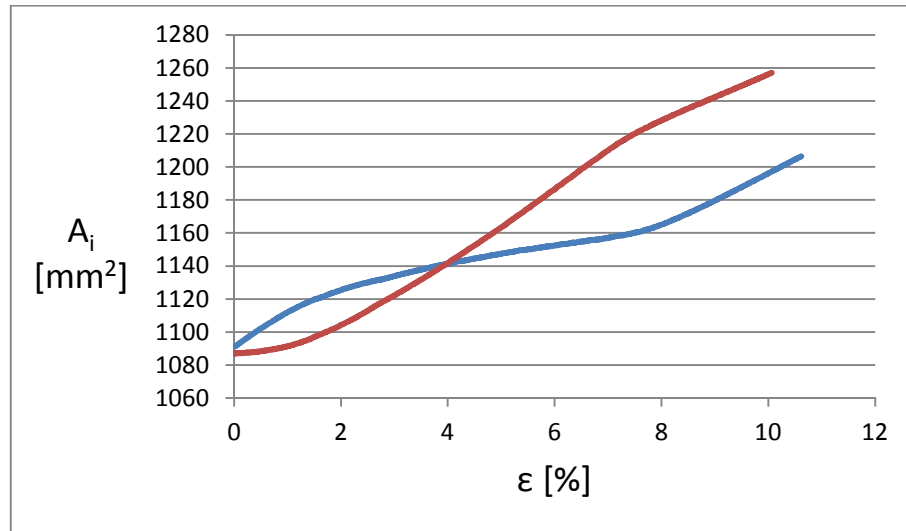
Při tomto pokusu počítač vyhodnotil změnu objemu jako modrou křivku (Obr. 3-19). Napadlo mě odečíst plochu pístu jako funkci deformace. Průměr pístu, který zajíždí do komory, je 2 cm. Z toho jsem spočítal plochu a v závislosti na deformaci mění se objem, který musí z komory vytéct, aby zůstal tlak na nastavené hodnotě. Když jsem od modré křivky odečetl hodnoty objemu vnikajícího pístu, vznikla červená křivka. Žlutá křivka je údaj odečtený při ručním odečítání z pump. Je vidět, že tyto křivky jsou téměř identické. Žlutá křivka patří přímo pumpě, která měří změnu objemu ve vzorku.



Obr. 3-19 Průběh objemových změn naměřených ručně a počítačem

Pro další vyhodnocení jsem již neodečítal hodnoty ručně, ale pouze aplikoval systém odečítání plochy pístu.

Pro ověření vyhodnocení jsem porovnával průběh napětí vyhodnocený programem a průběhem, který jsem sám sestavil pouze z přímo naměřených hodnot axiálního posunu, axiální síly, tlaku v komoře a ve vzorku. Našel jsem zde spoustu nesrovnalostí, např. výpočet poměrného osového přetvoření neodpovídal přesně mému vyhodnocení, přestože se jedná o jednoduchý výpočet pomocí jednoho vzorce. Oprava poměrného přetvoření byla ale malá a rozdíl mezi deviatorickým napětím, vypočítaným programem a mnou, to neopravilo. Další nesrovnalost jsem objevil ve výpočtu aktuální plochy vzorku v průběhu zkoušky (Obr. 3-20).



Obr. 3-20 Rozdíl mezi změnou plochy vzorku stanovenou programem (modrá) a mým výpočtem (červená)

Výpočet plochy měl největší vliv na rozdíl ve výpočtu deviatorického napětí. Při výpočtu plochy jsem postupoval takto:

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta h}{h_0}$$

$\varepsilon_a$  – poměrné osové přetvoření

$\Delta h$  - změna výšky vzorku

$h_0$  – původní výška vzorku

$$\varepsilon_V = \frac{\Delta V}{V_0}$$

$\varepsilon_V$  – poměrné objemové přetvoření

$\Delta V$  – změna objemu vzorku

$V_0$  – původní objem vzorku

$$A_i = \frac{V_i}{h_i}$$

$$V_i = V_0 + \Delta V = V_0 + V_0 \cdot \varepsilon_V = V_0(1 + \varepsilon_V)$$

$$h_i = h_0 + \Delta h = h_0 + h_0 \cdot \varepsilon_a = h_0(1 + \varepsilon_a)$$

$$A_i = \frac{V_i}{h_i} = \frac{V_0(1 + \varepsilon_V)}{h_0(1 + \varepsilon_a)} = A_0 \cdot \frac{(1 + \varepsilon_V)}{(1 + \varepsilon_a)}$$

$$A_i = A_0 \cdot \frac{(1 + \varepsilon_V)}{(1 + \varepsilon_a)}$$

$A_i$  – aktuální plocha vzorku v průběhu zkoušky

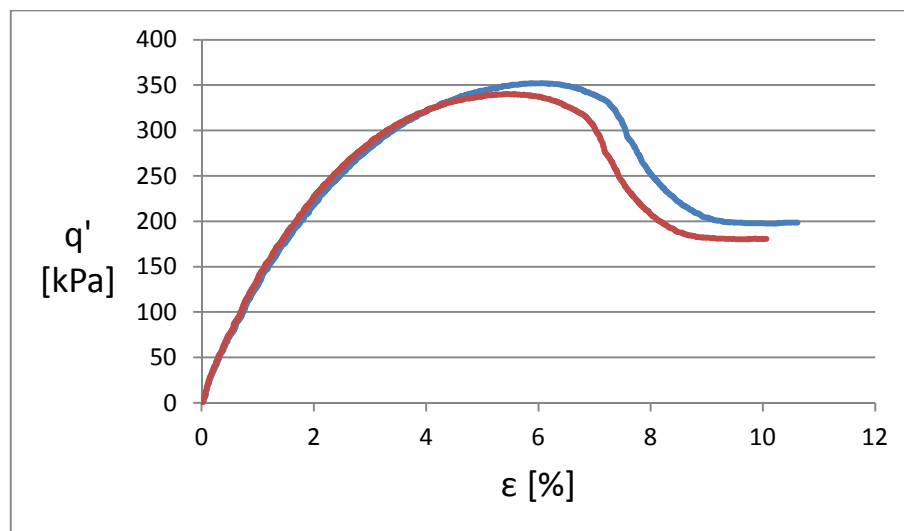
$V_i$  – aktuální objem vzorku v průběhu zkoušky

$h_i$  – aktuální výška vzorku v průběhu zkoušky

$A_0$  – původní plocha vzorku

Výpočet plochy se mění v závislosti na změně poměrného osového a objemového přetvoření. Pokud si představíme jaký je typický průběh objemových změn, kde vzorek má nejdříve kontraktantní chování a následně dilatantní, projeví se tento průběh i v průběhu změny plochy. Objemové přetvoření figurují ve výpočtu plochy v čitateli. Mělo by tedy platit, že pokud za poměrné objemové přetvoření dosazujeme nejprve číslo záporné, roste tento zlomek nejprve pomaleji a následně, když nastane stav dilatance, bude změna objemu kladná a zlomek poroste rychleji. Tomuto předpokladu ale křivka stanovená počítačem vůbec neodpovídá.

Na základě všech těchto zjištění jsem se rozhodl pokračovat ve vyhodnocování pouze se svými vlastními výpočty a z výsledku zkoušek si vzít jen data, která byla skutečně naměřená pomocí senzoru deformace, siloměru, tlaků v komoře a ve vzorku a z objemových změn vzorku s úpravou pomocí odečítání plochy vnikajícího pístu, jak jsem popsal dříve.



Obr. 3-21 Rozdíl průběhu deviatoru napětí mezi vyhodnocením programu a mým výpočtem

Rozdíl mezi takto vyhodnocenými daty a daty, která stanovil program ovládající zkoušku, je vidět v grafu (Obr. 3-21). Z průběhů napětí se stanovují pevnostní parametry, kde se výsledky liší o několik jednotek, přičemž z dat programu (modrá) vycházejí hodnoty úhlu vnitřního tření větší a z dat, které sám vypočítávám (červená), hodnoty menší.

Při výpočtu jednotlivých veličin jsem použil následující vztahy. Nejprve jsem stanovil průběh poměrného osového přetvoření, na základě hodnot změny výšky naměřené přístrojem a počáteční výšky vzorku, kterou jsem naměřil před zkouškou.

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta h}{h_0}$$

Podobně jsem postupoval při stanovení poměrného objemového přetvoření, které jsem vypočítal pomocí hodnot naměřených přístrojem opravených o vnikající píst a původního objemu vzorku vypočítaného z průměru a počáteční výšky vzorku.

$$\varepsilon_V = \frac{\Delta V}{V_0}$$

Z hodnot poměrných přetvoření jsem následně vypočítával změnu plochy.

$$A_i = A_0 \cdot \frac{(1 + \varepsilon_V)}{(1 + \varepsilon_a)}$$

Pomocí hodnot zaznamenaných siloměrem přístroje a vypočtené plochy vzorku jsem v každém kroku zkoušky stanovil deviatorické napětí působící na vzorek.

$$q = \frac{F_i}{A_i}$$

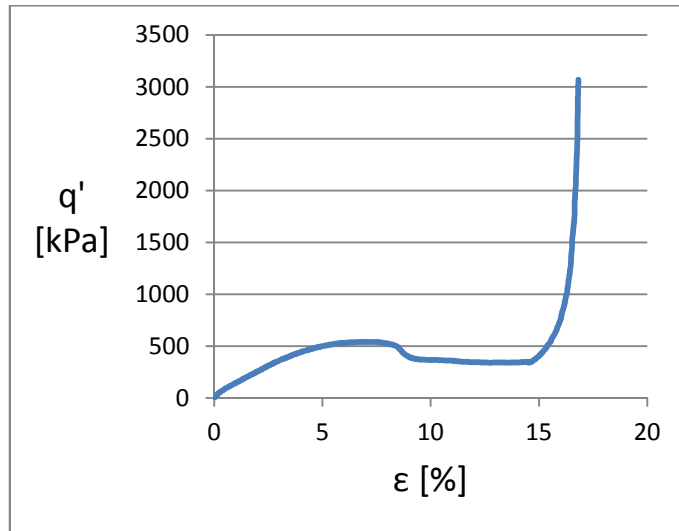
Na základě maxima deviatorického napětí a hodnoty na konci zkoušky jsem mohl vykreslit mohrovy kružnice odpovídající těmto stavům napětí a vypočítat hodnoty úhlu vnitřního tření, vrcholové a kritické.

### 3.3.3. Výsledky triaxiálních zkoušek

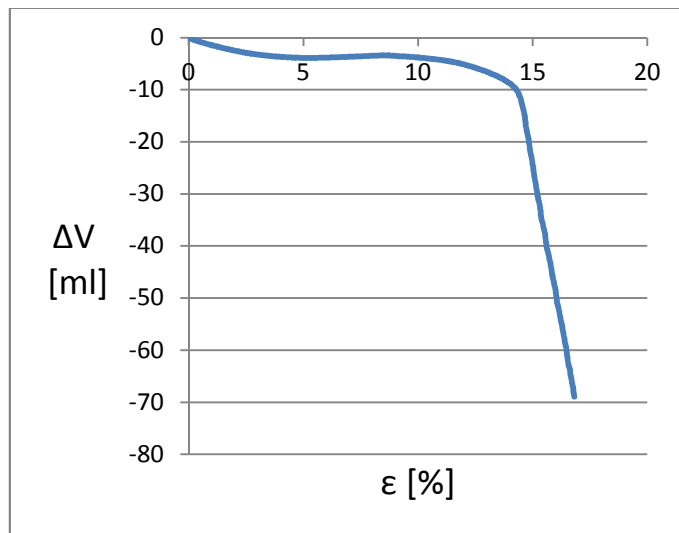
Triaxiální zkoušky jsem provedl na 15 vzorcích. Protokoly o každé ze zkoušek jsou uvedené v přílohách (Příloha 3). Součástí protokolů jsou i zkoušky, které jsou nepovedené.

Za nepovedené zkoušky může zejména netěsnost na přívodních hadičkách k vrchní podstavě vzorku, netěsnost gumové membrány, zavzdušnění komory a hadiček a příliš velká rychlost zatěžování málo propustných vzorků.

Hadičky do sebe zapadají plastovým zámkem, který se po připojení hadiček pootočením uzamkne, bohužel tento kontakt se mi několikrát nepovedlo dobře utěsnit. Pokud jsem si netěsnosti všiml již v průběhu sycení (neustálá změna objemu vody v komoře), komoru jsem znovu vypustil a hadičky jsem se lepším dotlačením spoje pokusil utěsnit. Bohužel, někdy se netěsnost projevila až v průběhu zkoušky nebo po zkoušce na průběžích napětí a objemových změn. V jednom případě netěsnost vznikla protržením membrány na vzorku, což se projevilo okamžitým vyrovnáním tlaků ve vzorku a v komoře a velkou zápornou změnou objemové změny vzorku (Obr. 3-22, Obr. 3-23).

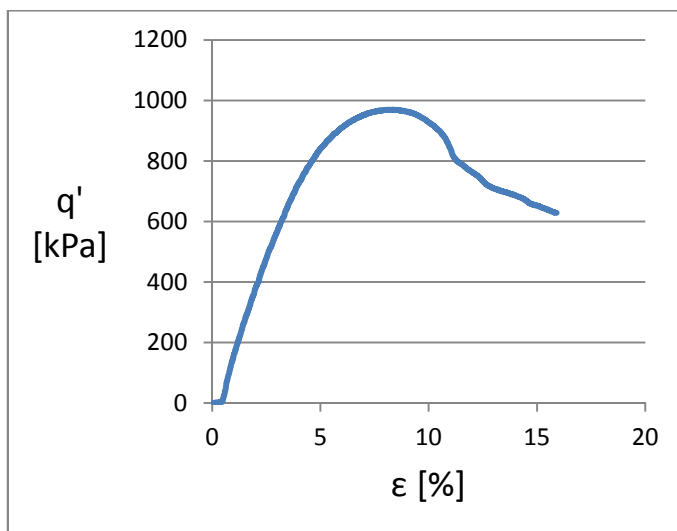


Obr. 3-22 Nepovedený vzorek (Příloha 3.2.)

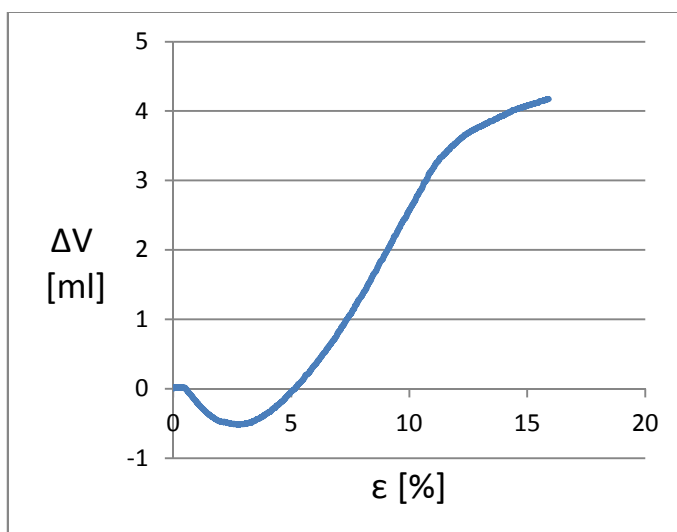


Obr. 3-23 Nepovedený vzorek (Příloha 3.2.)

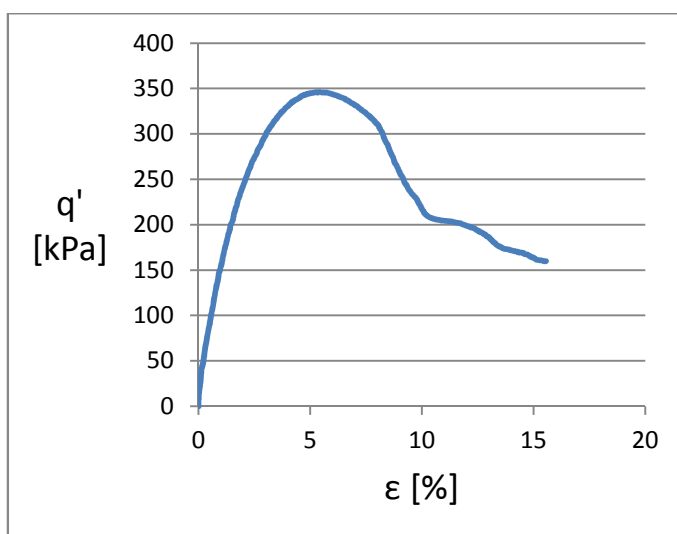
Další zkoušky se staly nepovedenými v důsledku velké rychlosti zatěžování, zejména vzorky se součinitelem propustnosti  $k=10^{-8}$  a menším. Tento případ je vidět na objemových změnách, kde se tyto změny neprojevují v grafu aktuálně, ale v důsledku malé propustnosti se zpožděním (Obr. 3-24, Obr. 3-25, Obr. 3-26, Obr. 3-27)



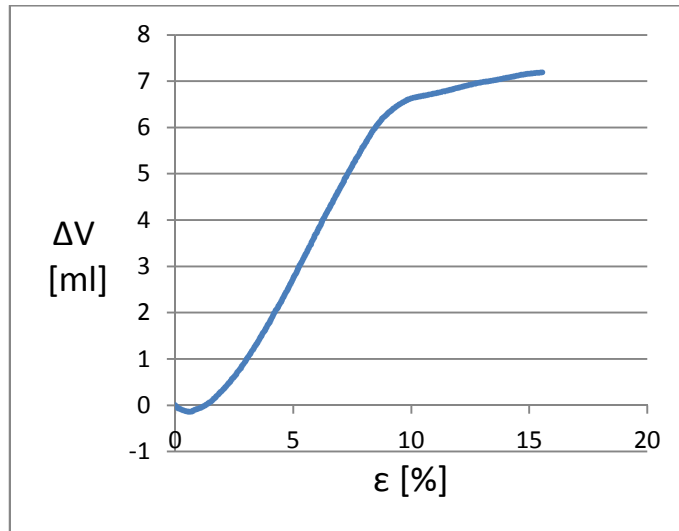
Obr. 3-24 Nepovedený vzorek (Příloha 3.12.)



Obr. 3-25 Nepovedený vzorek (Příloha 3.12.)

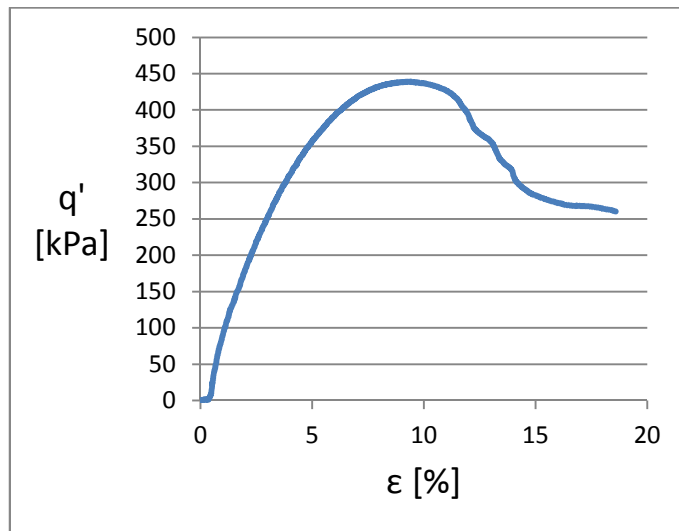


Obr. 3-26 Nepovedený vzorek (Příloha 3.15.)

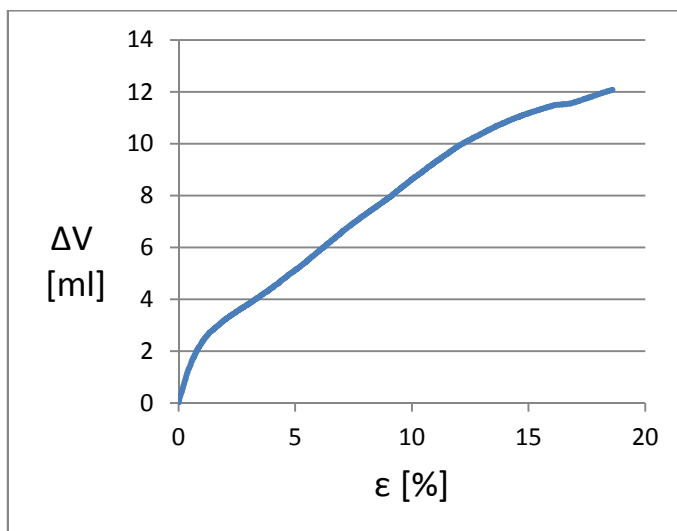


Obr. 3-27 Nepovedený vzorek (Příloha 3.15.)

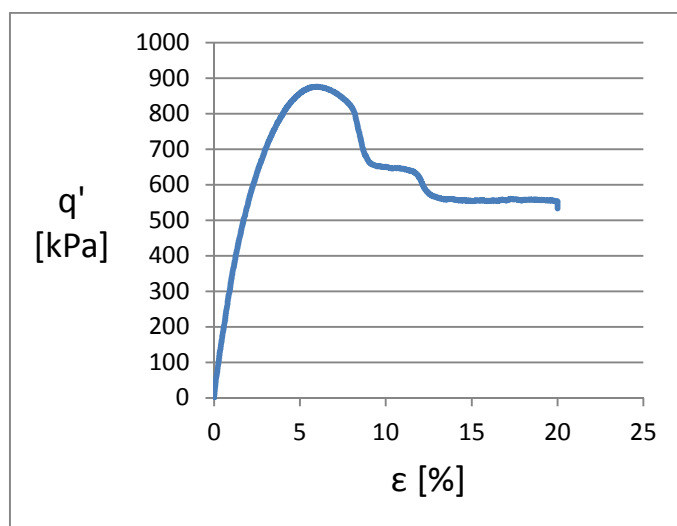
Podle mého názoru při některých zkouškách v důsledku rychlého zatížení vzniká při horní podstavě velký pórový tlak, který pro malou propustnost nemůže disipovat ve směru dolní podstavy, kde by tento tlak mohl v podobě přebytečné vody odtéct hadičkami do pumpy a projevit se záporně na příspěvku objemové změny. Takto vzniklý tlak neudrží gumičkový spoj na gumové membráně a vodu propustí do komory. Z komory musí být tato přebytečná voda odčerpána pumpou a toto se projeví jako nepřiměřená kladná objemová změna ve vzorku. (Obr. 3-28, Obr. 3-29, Obr. 3-30, Obr. 3-31, Obr. 3-32, Obr. 3-33)



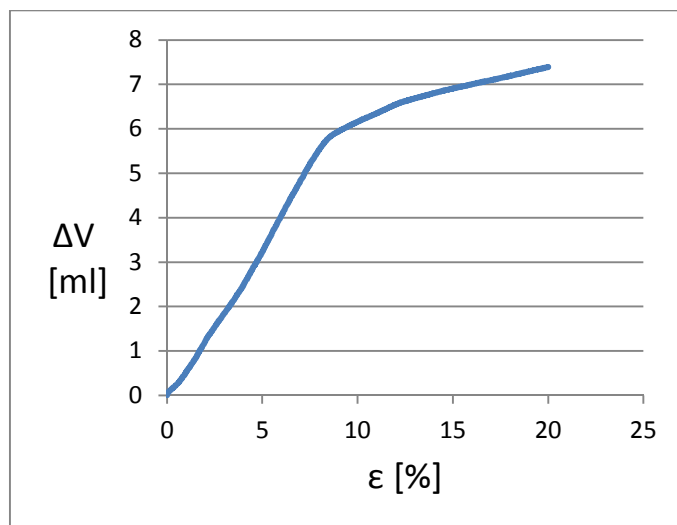
Obr. 3-28 Nepovedený vzorek (Příloha 3.4.)



Obr. 3-29 Nepovedený vzorek (Příloha 3.4.)

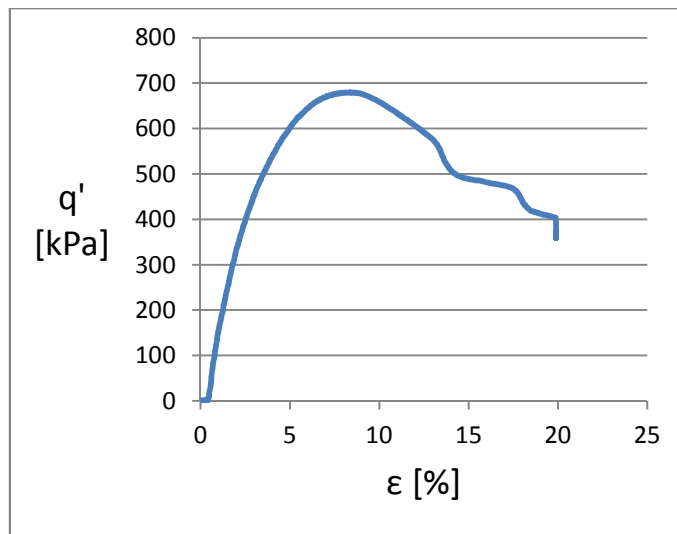


Obr. 3-30 Nepovedený vzorek (Příloha 3.9.)

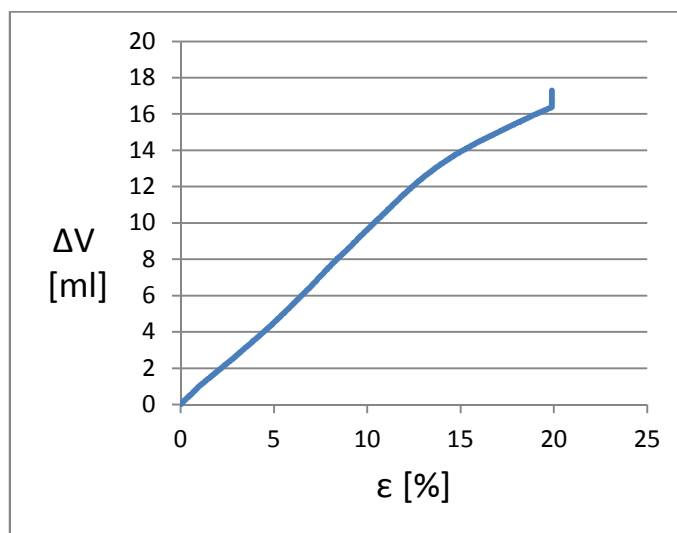


Obr. 3-31 Nepovedený vzorek (Příloha 3.9.)





Obr. 3-32 Nepovedený vzorek (Příloha 3.14.)



Obr. 3-33 Nepovedený vzorek (Příloha 3.14.)

V zobrazení poměrné osové deformace a deviatorického napětí vypadají některé zkoušky jako vyhovující. Výsledek takto vyhodnocené zkoušky ale nelze brát jako úplně relevantní. Deviator napětí a poté úhel vnitřního tření závisí na změně objemových změn, a proto takové vyhodnocení neodpovídá pravdě. Takovéto vzorky jsem proto z výsledků vyloučil.

Sestavil jsem tabulku výsledných úhlu vnitřního tření vyhodnocených při triaxiální zkoušce (Tabulka 3-3).

Název vzorku	Stav zkoušky	Úhel vnitřního tření	
		Vrcholový [°]	Kritický [°]
B2 30,0-31,0 400_200 (Příloha 3.1.)	povedená	43,3	39,8
B3 52,0-52,5 200_100 (Příloha 3.2.)	nepovedená	-	-
B3 52,0-52,5 700_300 (Příloha 3.3.)	povedená	43,8	34,9
B3 65,6-65,9 200_100 (Příloha 3.4.)	nepovedená	-	-
B4 0,0-1,5 100_50 (Příloha 3.5.)	povedená	48,1	42,7
B4 0,0-1,5 200_100 (Příloha 3.6.)	povedená	43,2	37,4
B4 22,1-22,5 200_100 (Příloha 3.7.)	povedená	47,4	38,5
B4 22,1-22,5 400_200 (Příloha 3.8.)	povedená	45,5	37,8
B5 8,0-11,0 400_200 (Příloha 3.9.)	nepovedená	-	-
B5 35,6-35,9 100_50 (Příloha 3.10.)	povedená	50,5	39,8
B5 35,6-35,9 200_100 (Příloha 3.11.)	povedená	48,6	38,6
B5 35,6-35,9 400_200 (Příloha 3.12.)	nepovedená	-	-
B5 39,2-39,3 400_200 (Příloha 3.13.)	povedená	46,3	35,6
B5 39,3-39,4 200_100 (Příloha 3.14.)	nepovedená	-	-
B5 39,4-39,5 100_50 (Příloha 3.15.)	nepovedená	-	-

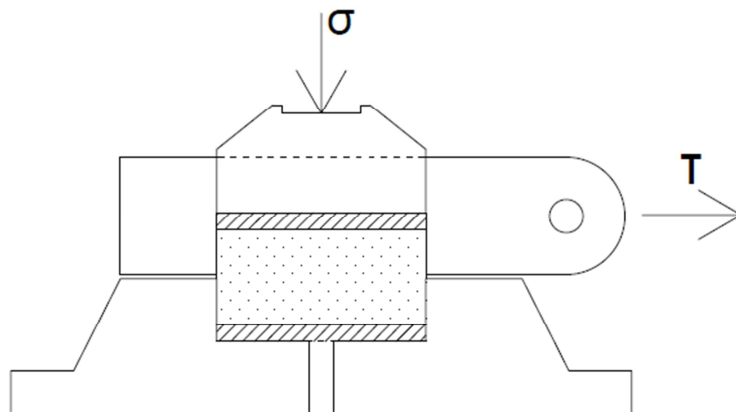
**Tabulka 3-3 Výsledky triaxiálních zkoušek**

## 3.4. Krabicová smyková zkouška

### 3.4.1. Postup zkoušky

Krabicová smyková zkouška slouží pro získání pevnostních parametrů zemin. Vzorek v krabicovém přístroji může volně drénovat, získáme tak efektivní smykové parametry vzorku. Prostor pro vzorek v krabicovém přístroji má tvar čtverce o délce strany 85 mm. Z odebraných neporušených vzorků nebylo možné takto velký rozměr vyřezat a tak jsem zkoušky realizoval na rekonstituovaném vzorku.

Krabicový přístroj (Obr. 3-34) sestává ze dvou čelistí, které po sobě mohou volně klouzat, z filtračních destiček, závaží pro vnesení svislého napětí, zařízení pro pohyb horní čelisti a vnesení smykového napětí do vzorku a senzorů pro měření smykového posunu a smykové síly.



Obr. 3-34 Schéma krabicového smykového přístroje

Do spodní části krabicového přístroje jsem umístil filtrační destičku a na ní nasypal množství vzorku tak, aby se polovina vzorku nacházela ve spodní čelisti a polovina v horní. Na horní část vzorku jsem položil horní filtrační destičku a segment o velikosti otvoru pro vzorek. Tento segment byl zatížen pomocí závaží a přenášel takto vzniklé svislé napětí do vzorku. Připravil jsem na zkoušku 4 další čelisti se stejným vzorkem, které jsem ale zatížil různými napětími 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa, 200 kPa (Obr. 3-35). Z průběhu smýkání lze stanovit vrcholové a kritické parametry zeminy. Porušení vzorku se stane na ploše, která je daná konstrukcí přístroje. Normálové napětí je celou dobu zkoušky i v průběhu porušení vzorku konstantní, mění se pouze smykové napětí vlivem posunu čelisti. Úhel vnitřního tření se vyhodnotí z tohoto normálového napětí a smykového napětí odpovídajícímu porušení vzorku ve vrcholovém a kritickém stavu.

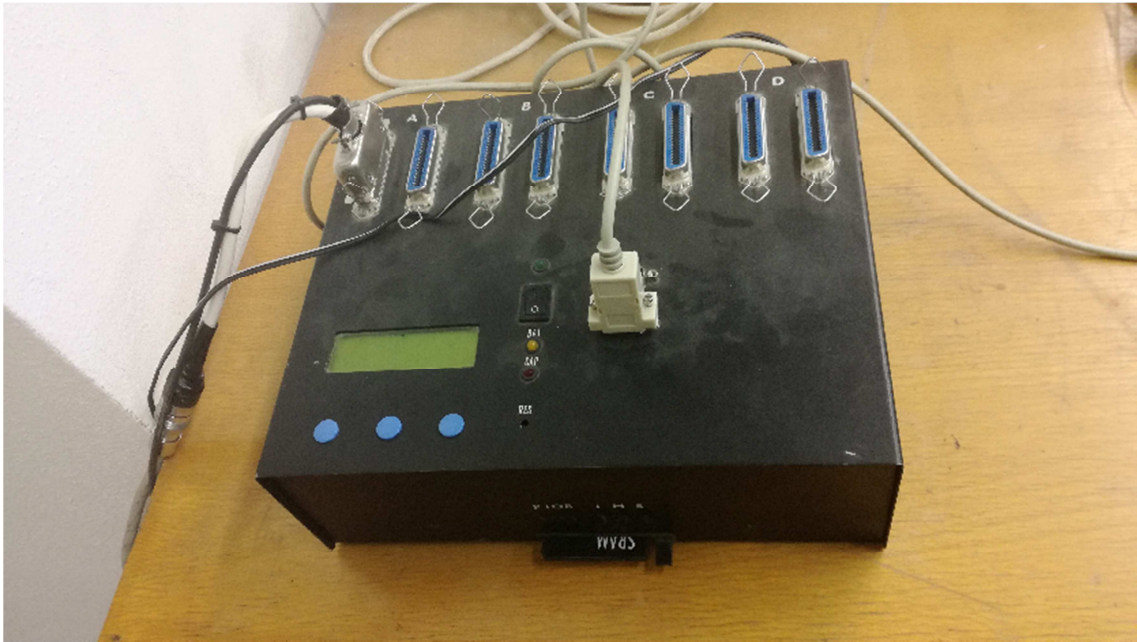
$$\varphi' = \arctan\left(\frac{\tau'}{\sigma'}\right)$$



Obr. 3-35 Krabicové smykové přístroje pro různá svislá napětí

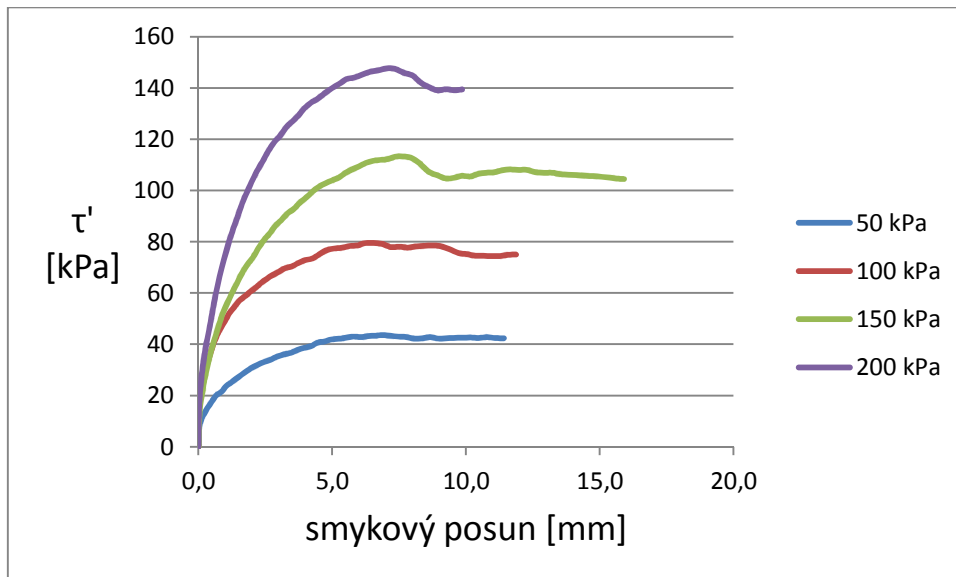
### 3.4.2. Výsledky zkoušek

Uskutečnění zkoušky a stanovení výsledků bylo značně komplikované. Smykové posuny a napětí byly naměřené a zaznamenávané zařízením (Obr. 3-36) ve formě elektrického proudu. Toto záznamové zařízení vykazovalo značnou nespolehlivost a pro jeho nefunkčnost bylo nutné zkoušku několikrát odložit. Po úspěšném vykonání zkoušek a následném vyhodnocení průběhů jsem pojal podezření na jistou nesprávnost výsledků. Při přepočtu dat na napětí a posuny jsem postupoval na základě podkladů, u kterých nemohu garantovat správnost. Pro správné a důvěryhodné vyhodnocení by bylo nutné hodnoty ze záznamového zařízení kalibrovat. Z důvodu komplikovanosti a časté nefunkčnosti přístroje jsem se takovéto kalibraci nevěnoval a zkoušku neopakoval.



Obr. 3-36 Záznamové zařízení

Při samotné zkoušce jsem se také dopustil chyby, že jsem nevěnoval pozornost takzvanému odtrhu čelistí. Toto se projevilo na průběhu zkoušky tak, že po začátku smýkání rostlo smykové napětí ale posun nikoliv. Tento stav trval, dokud smykové napětí nepřekonal velikost tření způsobené kontaktem čelistí. Lze to vidět na začátku smýkání (Obr. 3-37).



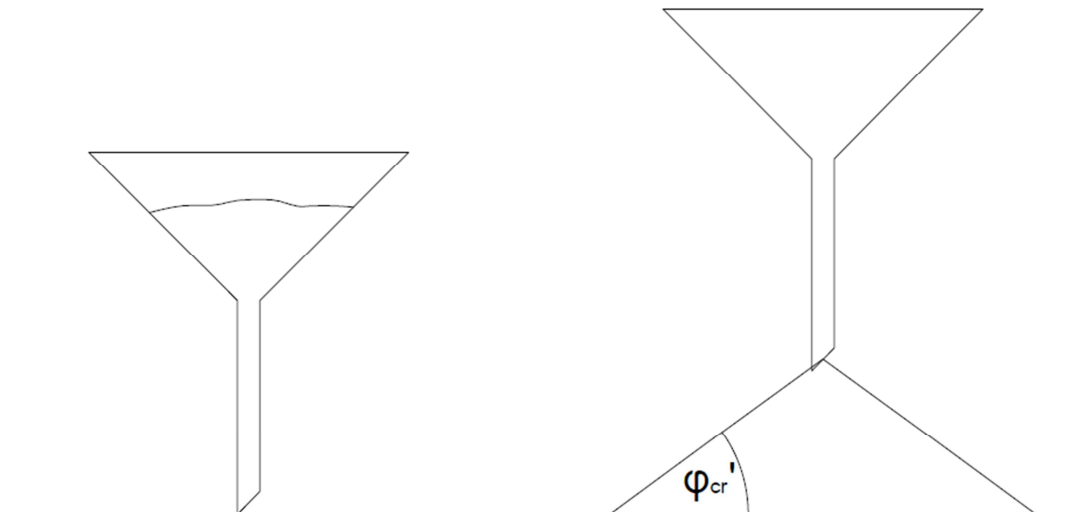
Obr. 3-37 Průběh krabicové zkoušky pro jednotlivá svislá napětí

## 3.5. Sypný úhel

### 3.5.1. Postup zkoušky

Zkouška sypným úhlem je poměrně jednoduchá a časově nenáročná. Touto zkouškou se získá efektivní hodnota kritického úhlu vnitřního tření. Výsledek lze použít k ověření hodnot efektivního kritického úhlu vnitřního tření získaného triaxiální zkouškou.

K uskutečnění zkoušky je třeba mít vysušený vzorek, podložku, plastový nebo skleněný trychtýř a úhloměr. Vybraný vzorek jsem dal nejprve vysušit do sušárny. Suchý vzorek jsem nasypal do trychtýře a umístil dnem na podložku. Trychtýř postupným zvedáním uvolňoval vzorek, který vytvářel kuželový tvar (Obr. 3-38). Trychtýř jsem zvedal dostatečně pomalu, aby zrna nikdy nepadala z výšky, ale vždy se kutálela po již vzniklém kuželu.



Obr. 3-38 Schéma postupu zkoušky sypným úhlem

Kritický úhel vnitřního tření jsem stanovil pouhým odměřením úhlu, který svírá hrana kužele s podložkou. Tento úhel je kritickým úhlem vnitřního tření právě tehdy, pokud zkoušku vykonáme dostatečně pomalu. Při pomalém sesouvání zrna získá vzorek právě kritickou pórovitost, která odpovídá kritickému stavu.

Pokud bychom trychtýř zvedli příliš rychle, zrníčka by kvůli zrychlení nedopadala volně, ale při dopadu by svojí kinetickou energií způsobila hutnění vzorku. Zhutněný vzorek by měl větší pevnost a vytvořil by kužel se strmější hranou. Takto změřený úhel by neodpovídal kritickému stavu, ale stavu vrcholovému, závislému na hodnotě pórovitosti. Pórovitost by při hutnění byla menší, než je kritická.

### 3.5.2. Výsledky zkoušek

Zkoušku jsem provedl na 2 vzorcích. Pro každý vzorek jsem udělal celkem 4 měření a z naměřených hodnot vypočítal aritmetický průměr (Tabulka 3-4).

Název vzorku	Úhel vnitřního tření v kritickém stavu [°]				
	1 měření	2 měření	3 měření	4 měření	Průměrná hodnota
B3 45,0-45,3	35	35,5	35	35	35,1
B4 22,1-22,5	35	36,5	37	36	36,1

Tabulka 3-4 Výsledky zkoušky sypným úhlem

Výsledek zkoušky jsem vyhodnotil odečtením úhlu na úhloměru, jak je vidět na obrázcích při měření dvou z osmi zkoušek (Obr. 3-39, Obr. 3-40).



Obr. 3-39 Zkouška sypným úhlem vzorku B3 45,0-45,3



Obr. 3-40 Zkouška sypným úhlem vzorku B4 22,1-22,5



## 4. ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo stanovení parametrů odpadních materiálů z odebraných vzorků z odkaliště Erdenet v Mongolsku. Z těchto vzorků jsem udělal zrnitostní rozbor a stanovil deformační a pevnostní parametry.

Zrnitostní rozbor jsem provedl na 3 vzorcích, které byly z různých vrtů a hloubek. Křivky zrnitosti byly různého tvaru a odpovídaly různým frakcím, tedy i odlišným druhům materiálů v rámci odkaliště.

Deformační parametry jsem stanovil zkouškou stlačitelnosti v edometru. Provedl jsem dvě zkoušky na různých vzorcích. Jednu zkoušku jsem provedl s krokovým zatěžováním a odtěžováním, druhou průběžným zatížením zadanou rychlostí a následným odlehčením. Stanovil jsem edometrické moduly odpovídající intervalům svislého napětí a parametry určené ze semilogaritmického zobrazení průběhu zkoušky.

Pevnostní parametry jsem získal zkouškou v triaxiálním přístroji a v krabicovém smykovém přístroji. Provedl jsem 15 odvodněných zkoušek v triaxiálním přístroji. Mnoho času jsem strávil řešením nesprávného přepočtu dat v programu ovládajícím přístroj. Zkoušky jsem se rozhodl vyhodnocovat vlastními výpočty pouze z naměřených hodnot deformace a síly. Při vyhodnocování vyplynulo, že některé zkoušky nevykazují správný průběh a považuji je za nepovedené. Šest nepovedených zkoušek jsem tedy vyloučil. Ostatních devět pokládám za provedené a vyhodnocené správně. Vyhodnotil jsem efektivní parametry ve vrcholovém a kritickém stavu. Úhel vnitřního tření ve vrcholovém stavu se pohyboval v intervalu  $43,2^{\circ}$ - $50,5^{\circ}$ , v kritickém stavu  $34,9^{\circ}$ - $42,7^{\circ}$ . Krabicovou smykovou zkoušku jsem provedl pro jeden vzorek pro 4 různá svislá napětí. Parametry získané touto zkouškou považuji za nepřesné z důvodu nespolehlivosti měřícího a záznamového zařízení. Nepřesný může být také přepočet elektrického proudu zaznamenaného senzory na hodnoty smykového napětí a smykového posunu. Vzorce na přepočet jsem pouze převzal a nekalibroval.

Pro ověření smykových parametrů jsem provedl zkoušku sypným úhlem. Zkoušku jsem provedl pro dva vzorky s výsledkem úhlu vnitřního tření v kritickém stavu o hodnotách  $35,1^{\circ}$  a  $36,1^{\circ}$ . Tyto výsledky korespondují s výsledky triaxiálních zkoušek stejných vzorků.

Při vypracování diplomové práce jsem se naučil používat zkušební přístroje v laboratoři mechaniky zemin. Řešení problému při provádění a vyhodnocování zkoušek mi pomohlo prohloubit znalosti mechaniky zemin a propojit již předem získané teoretické vědomosti s praktickou zkušeností. Z některých skutečností, zejména několika nepovedených zkoušek, jsem se poučil a v budoucnu se mnohých chyb vyvaruji. Rovněž problémy, které je třeba řešit při vyhodnocování, bych již byl schopen vyřešit rychleji a lépe.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Mongolsko dnes - rychlý rozvoj ekonomiky. <http://www.asian-center.cz>. [Online] [Citace: 21. 3 2017.] <http://www.asian-center.cz/?mongolsko-dnes-rychly-rozvoj-ekonomiky,34>.
2. <https://www.google.cz/maps/>. *Google Maps*. [Online] Google. [Citace: 21. 3 21.] <https://www.google.cz/maps/place/Erdenet,+Mongolsko/>.
3. **Bhanbhro, Riaz.** *Mechanical Properties of Tailings: Basic Description of a Tailings Material from Sweden*. Luleå, Sweden : Luleå University of Technology, 2014. 978-91-7439-993-6.
4. **Devi, Dipika.** On the determination of modified cam clay. *IJIRSET*. [Online] 4. 3 2014. [Citace: 24. 3 2017.] [https://www.ijirset.com/upload/2013/special/ncrace/32\\_\\_38051NCRACE13-037TRE-03.pdf](https://www.ijirset.com/upload/2013/special/ncrace/32__38051NCRACE13-037TRE-03.pdf). ISSN 2319 - 8753.
5. ČSN CEN ISO/TS 17892-5. *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 5: Stanovení stlačitelnosti zemin v edometru*. Praha : Český normalizační institut, 2005.
6. ČSN CEN ISO/TS 17892-9. *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 9: Konsolidovaná triaxiální zkouška vodou nasycených zemin*. Praha : Český normalizační institut, 2005.
7. ČSN CEN ISO/TS 17892-4. *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 4: Stanovení zrnitosti zemin*. Praha : Český normalizační institut, 2005.
8. ČSN CEN ISO/TS 17892-1. *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 1: Stanovení vlhkosti zemin*. Praha : Český normalizační institut, 2005.
9. ČSN CEN ISO/TS 17892-10. *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 10: Krabicová smyková zkouška*. Praha : Český normalizační institut, 2005.
10. ČSN CEN ISO/TS 17892-11. *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 11: Stanovení propustnosti zemin při konstantním*. Praha : Český normalizační institut, 2005.

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 2-1 Úhly vnitřního tření odebraných materiálů v různých hloubkách [3] .....	8
Tabulka 3-1 Edometrický modul pro intervaly napětí.....	15
Tabulka 3-2 Edometrický modul pro intervaly napětí.....	18
Tabulka 3-3 Výsledky triaxiálních zkoušek .....	34
Tabulka 3-4 Výsledky zkoušky sypným úhlem .....	39

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1-1 [2] Poloha odkaliště a města Erdenet.....	7
Obr. 2-1 Křivky zrnitosti materiálů z různé hloubky [3] .....	8
Obr. 3-1 Křivky zrnitosti vzorků.....	10
Obr. 3-2 Edometrický modul.....	12
Obr. 3-3 Součinitel stlačitelnosti .....	13
Obr. 3-4 Závislost napětí na číse pórovitosti.....	13
Obr. 3-5 Edometr .....	14
Obr. 3-6 Průběh zkoušky vzorku B3 45,0-45,3 .....	15
Obr. 3-7 Průběh zkoušky v zobrazení $\ln(\sigma'_v):\varepsilon_v$ .....	16
Obr. 3-8 Průběh čísla pórovitosti .....	16
Obr. 3-9 Průběh zkoušky v zobrazení $\log(\sigma'_v):e$ .....	17
Obr. 3-10 Průběh zkoušky vzorku B2 13,5-15,5 .....	17
Obr. 3-11 Průběh zatěžovací větve zkoušky v zobrazení $\ln(\sigma'_v):\varepsilon_v$ .....	18
Obr. 3-12 Průběh čísla pórovitosti .....	18
Obr. 3-13 Průběh zkoušky v zobrazení $\log(\sigma'_v):e$ .....	19
Obr. 3-14 Triaxiální smykový přístroj .....	20
Obr. 3-15 Rozdělení napětí působícího na vzorek v triaxiálu.....	20
Obr. 3-16 Průběh zkoušky a dráhy napětí při odvodněné zkoušce .....	21
Obr. 3-17 Mohrovo zobrazení napjatosti.....	22
Obr. 3-18 Vzorek připravený na zkoušku a vzorek po zkoušce.....	23
Obr. 3-19 Průběh objemových změn naměřených ručně a počítačem .....	25
Obr. 3-20 Rozdíl mezi změnou plochy vzorku stanovenou programem (modrá) a mým výpočtem (červená) .....	26
Obr. 3-21 Rozdíl průběhu deviatoru napětí mezi vyhodnocením programu a mým výpočtem .	27
Obr. 3-22 Nepovedený vzorek (Příloha 3.2.).....	29
Obr. 3-23 Nepovedený vzorek (Příloha 3.2.).....	29
Obr. 3-24 Nepovedený vzorek (Příloha 3.12.).....	30
Obr. 3-25 Nepovedený vzorek (Příloha 3.12.).....	30
Obr. 3-26 Nepovedený vzorek (Příloha 3.15.).....	30
Obr. 3-27 Nepovedený vzorek (Příloha 3.15.).....	31
Obr. 3-28 Nepovedený vzorek (Příloha 3.4.).....	31
Obr. 3-29 Nepovedený vzorek (Příloha 3.4.).....	32
Obr. 3-30 Nepovedený vzorek (Příloha 3.9.).....	32
Obr. 3-31 Nepovedený vzorek (Příloha 3.9.).....	32
Obr. 3-32 Nepovedený vzorek (Příloha 3.14.).....	33
Obr. 3-33 Nepovedený vzorek (Příloha 3.14.).....	33
Obr. 3-34 Schéma krabicového smykového přístroje .....	35
Obr. 3-35 Krabicové smykové přístroje pro různá svislá napětí .....	36
Obr. 3-36 Záznamové zařízení.....	37
Obr. 3-37 Průběh krabicové zkoušky pro jednotlivá svislá napětí .....	37
Obr. 3-38 Schéma postupu zkoušky sypným úhlem .....	38
Obr. 3-39 Zkouška sypným úhlem vzorku B3 45,0-45,3.....	39

Obr. 3-40 Zkouška sypným úhlem vzorku B4 22,1-22,5..... 40

## SEZNAM PŘÍLOH

P 1.1.:	Protokol o stanovení indexových parametrů zemin vzorku B2 42,5
P 1.2.:	Protokol o stanovení indexových parametrů zemin vzorku B3 5,5
P 1.3.:	Protokol o stanovení indexových parametrů zemin vzorku B3 69,1
P 2.1.:	Protokol o zkoušce stlačitelnosti v edometru vzorku B2 13,5-15,5
P 2.2.:	Protokol o zkoušce stlačitelnosti v edometru vzorku B3 45,0-45,3
P 3.1.:	Protokol o odvodněné triaxiální zkoušce vzorku B2 30,0-31,0 400_200
P 3.2.:	Protokol o odvodněné triaxiální zkoušce vzorku B3 52,0-52,5 200_100
P 3.3.:	Protokol o odvodněné triaxiální zkoušce vzorku B3 52,0-52,5 700_300
P 3.4.:	Protokol o odvodněné triaxiální zkoušce vzorku B3 65,6-65,9 200_100
P 3.5.:	Protokol o odvodněné triaxiální zkoušce vzorku B4 0,0-1,5 100_50
P 3.6.:	Protokol o odvodněné triaxiální zkoušce vzorku B4 0,0-1,5 200_100
P 3.7.:	Protokol o odvodněné triaxiální zkoušce vzorku B4 22,1-22,5 200_100
P 3.8.:	Protokol o odvodněné triaxiální zkoušce vzorku B4 22,1-22,5 400_400
P 3.9.:	Protokol o odvodněné triaxiální zkoušce vzorku B5 8,0-11,0 400_200
P 3.10.:	Protokol o odvodněné triaxiální zkoušce vzorku B5 35,6-35,9 100_50
P 3.11.:	Protokol o odvodněné triaxiální zkoušce vzorku B5 35,6-35,9 200_100
P 3.12.:	Protokol o odvodněné triaxiální zkoušce vzorku B5 35,6-35,9 400_200
P 3.13.:	Protokol o odvodněné triaxiální zkoušce vzorku B5 39,2-39,3 400_200
P 3.14.:	Protokol o odvodněné triaxiální zkoušce vzorku B5 39,3-39,4 200_100
P 3.15.:	Protokol o odvodněné triaxiální zkoušce vzorku B5 39,4-39,5 100_50
P 4.:	Protokol o krabicové smykové zkoušce vzorku B6 26,7

## Příloha 1.1. Protokol o stanovení indexových parametrů zemin

Název vzorku	<b>B2 42,5</b>	Datum	17.3.2017
		Zkoušku provedl	Marek Bartoň

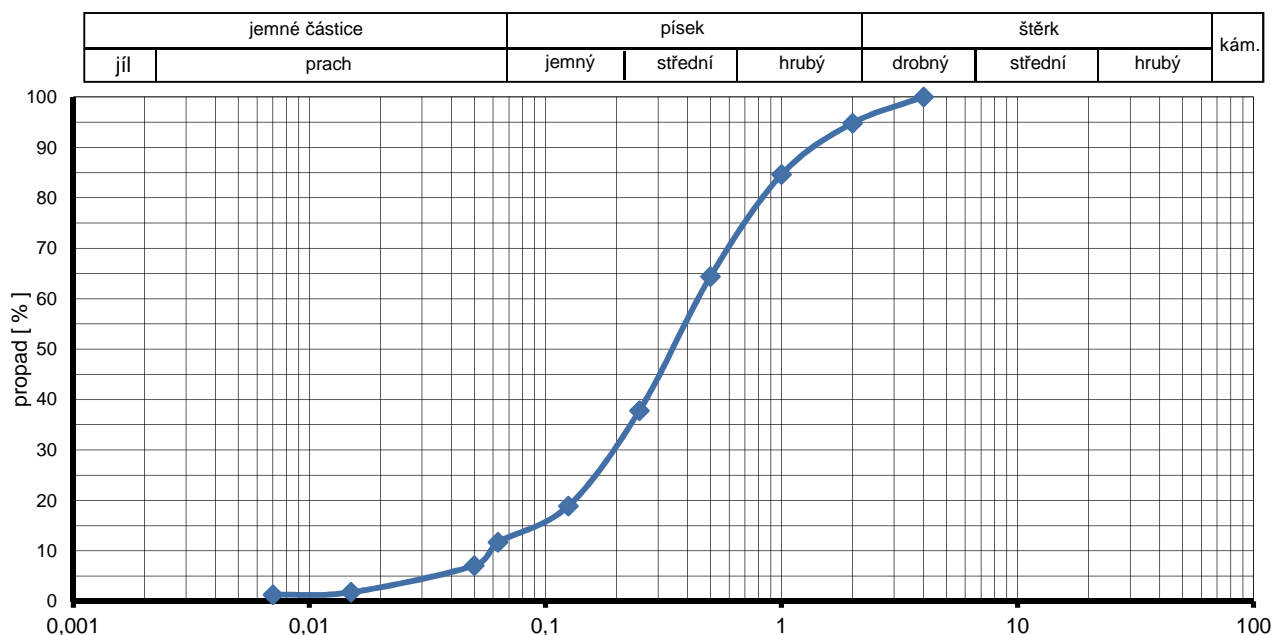
### Zastoupení frakcí ve vzorku

složka	jíl	prach	písek	štěrk	kámen
podíl frakce [%]	0,0	11,7	83,1	5,2	0,0
	11,7		88,3		0,0

rozměr oka síta [mm]	<0,063	0,063	0,125	0,250	0,500	1	2	4	8	16	31,5	63
propad [%]	11,7	11,7	18,9	37,8	64,4	84,6	94,8	100	100	100	100	100

### Zrnitostní křivka



Zatřídění

Střednězrný písek s příměsí prachu

### Ostatní vlastnosti

přirozená vlhkost	w	21,9	%		D10	0,058
číslo nestejnozrnnosti	Cu	7,881	-		D30	0,198
číslo křivosti	Cc	1,475	-		D60	0,459

## Příloha 1.2. Protokol o stanovení indexových parametrů zemin

Název vzorku	<b>B3 5,5</b>	Datum	17.3.2017
		Zkoušku provedl	Marek Bartoň

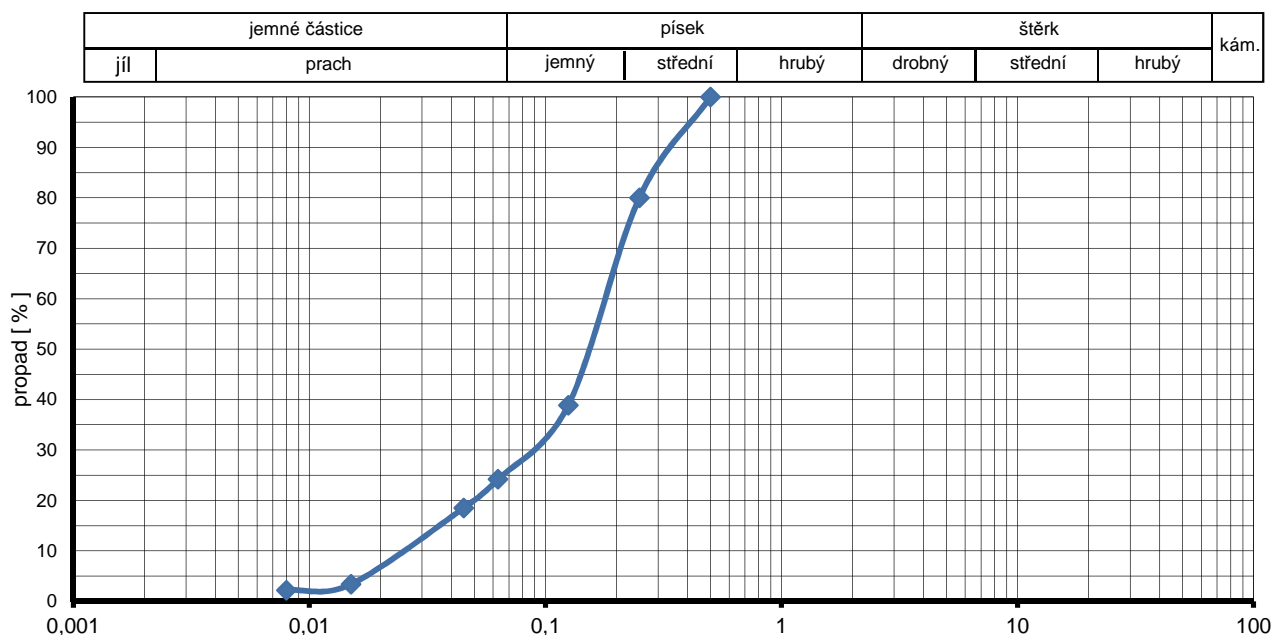
### Zastoupení frakcí ve vzorku

složka	jíl	prach	písek	štěrk	kámen
podíl frakce [%]	0,0	24,2	75,8	0,0	0,0
	24,2		75,8		0,0

rozměr oka síta [mm]	<0,063	0,063	0,125	0,250	0,500	1	2	4	8	16	31,5	63
propad [%]	24,2	24,2	38,9	80	100,0	100,0	100,0	100	100	100	100	100

### Zrnitostní křivka



Zatřídění

Jemnozrnný písek prachovitý

### Ostatní vlastnosti

přirozená vlhkost	w	22,4	%		D10	0,028
číslo nestejnozrnnosti	Cu	6,729	-		D30	0,087
číslo křivosti	Cc	1,438	-		D60	0,189



## Příloha 1.3. Protokol o stanovení indexových parametrů zemin

Název vzorku	<b>B3 69,10</b>	Datum	17.3.2017
		Zkoušku provedl	Marek Bartoň

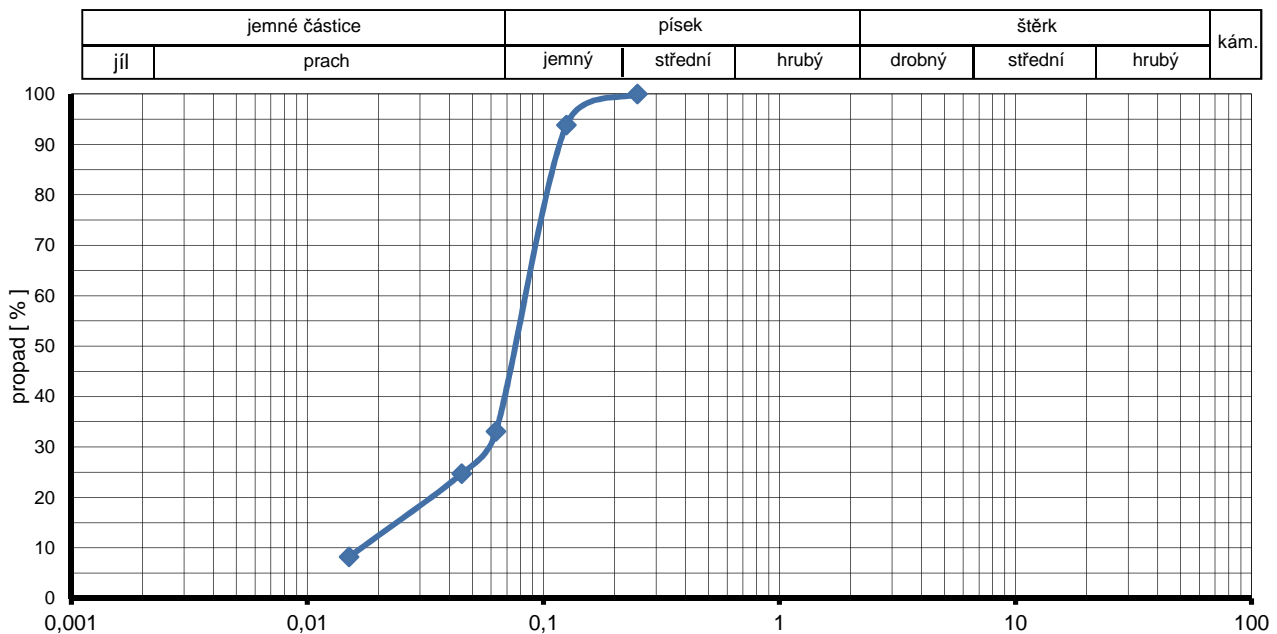
### Zastoupení frakcí ve vzorku

složka	jíl	prach	písek	štěrk	kámen
podíl frakce [%]	0,0	33,1	66,9	0,0	0,0
	33,1		66,9		0,0

rozměr oka síta [mm]	<0,063	0,063	0,125	0,250	0,500	1	2	4	8	16	31,5	63
propad [%]	33,1	33,1	93,8	100	100,0	100,0	100,0	100	100	100	100	100

### Zrnitostní křivka



Zatřídění

Jemnozrnný písek prachovitý

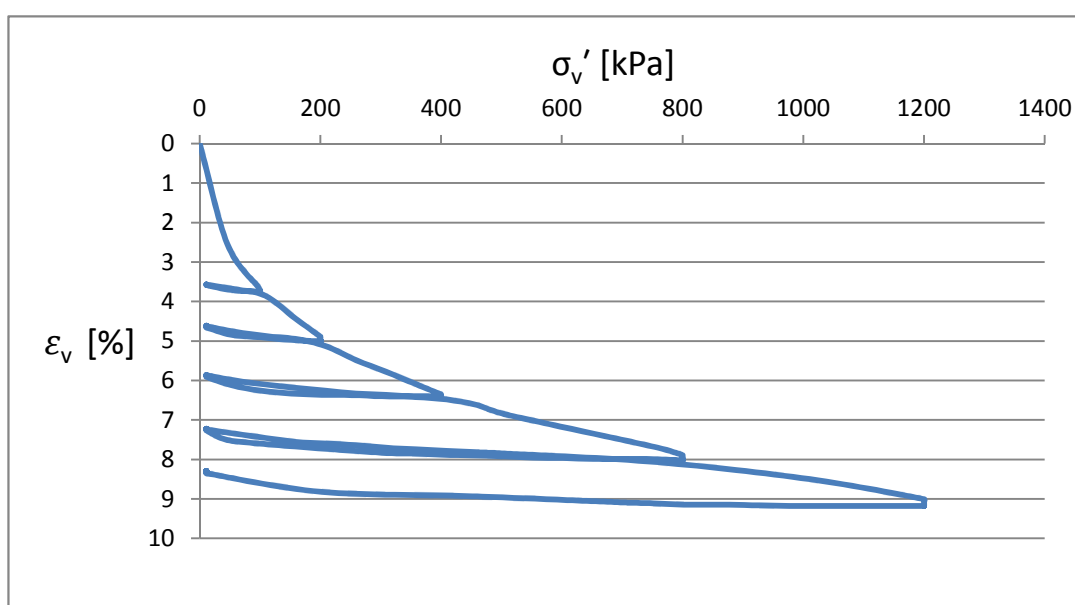
### Ostatní vlastnosti

přirozená vlhkost	w	34,4	%		D10	0,018
číslo nestejnozrnnosti	Cu	4,951	-		D30	0,056
číslo křivosti	Cc	1,921	-		D60	0,090

## Příloha 2.1.: Protokol o zkoušce stlačitelnosti v edometru

Název vzorku	<b>B2 13,5 - 15,5</b>	Datum	8.4.2016
		Zkoušku provedl	Marek Bartoň
Hmotnost vzorku	$m_s =$	<b>114,8</b>	g
Hustota pevných částic	$\rho_s =$	<b>2,73</b>	g/cm <sup>3</sup>
Počáteční číslo pórovitosti	$e_0 =$	<b>0,902</b>	-

Průběh zkoušky:



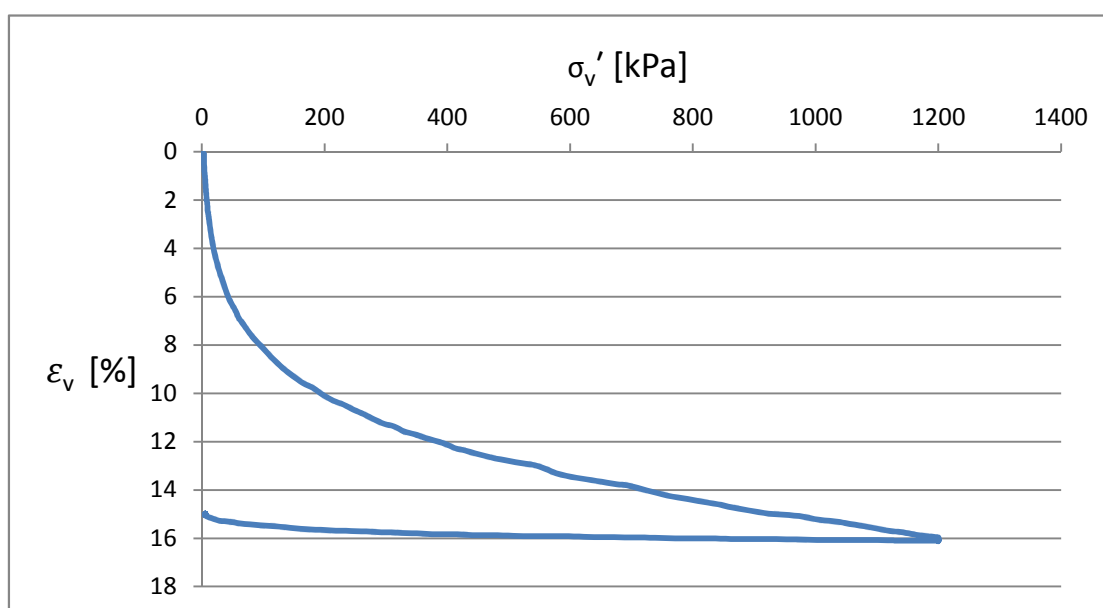
Vyhodnocení:

Interval napětí	$\sigma'_v$ [kPa]	0-50	50-100	100-300	300-800	800-1200
Edometrický modul	$E_{oed}$ [MPa]	<b>1,80</b>	<b>4,59</b>	<b>10,16</b>	<b>21,93</b>	<b>34,00</b>
Součinitel stlačitelnosti	$C =$	<b>47,619</b>		-		
Index stlačitelnosti	$C_c =$	<b>0,0919</b>		-		
Index stlačitelnosti pro odelhčení	$C_s =$	<b>0,00646</b>		-		
	$\lambda =$	<b>0,0399</b>		-		
	$\kappa =$	<b>0,0028</b>		-		

## Příloha 2.2.: Protokol o zkoušce stlačitelnosti v edometru

Název vzorku	<b>B3 45,0 - 45,3</b>	Datum	5.4.2016
		Zkoušku provedl	Marek Bartoň
Hmotnost vzorku	$m_s =$	<b>100,28</b>	g
Hustota pevných částic	$\rho_s =$	<b>2,73</b>	g/cm <sup>3</sup>
Počáteční číslo pórovitosti	$e_0 =$	<b>1,178</b>	-

Průběh zkoušky:



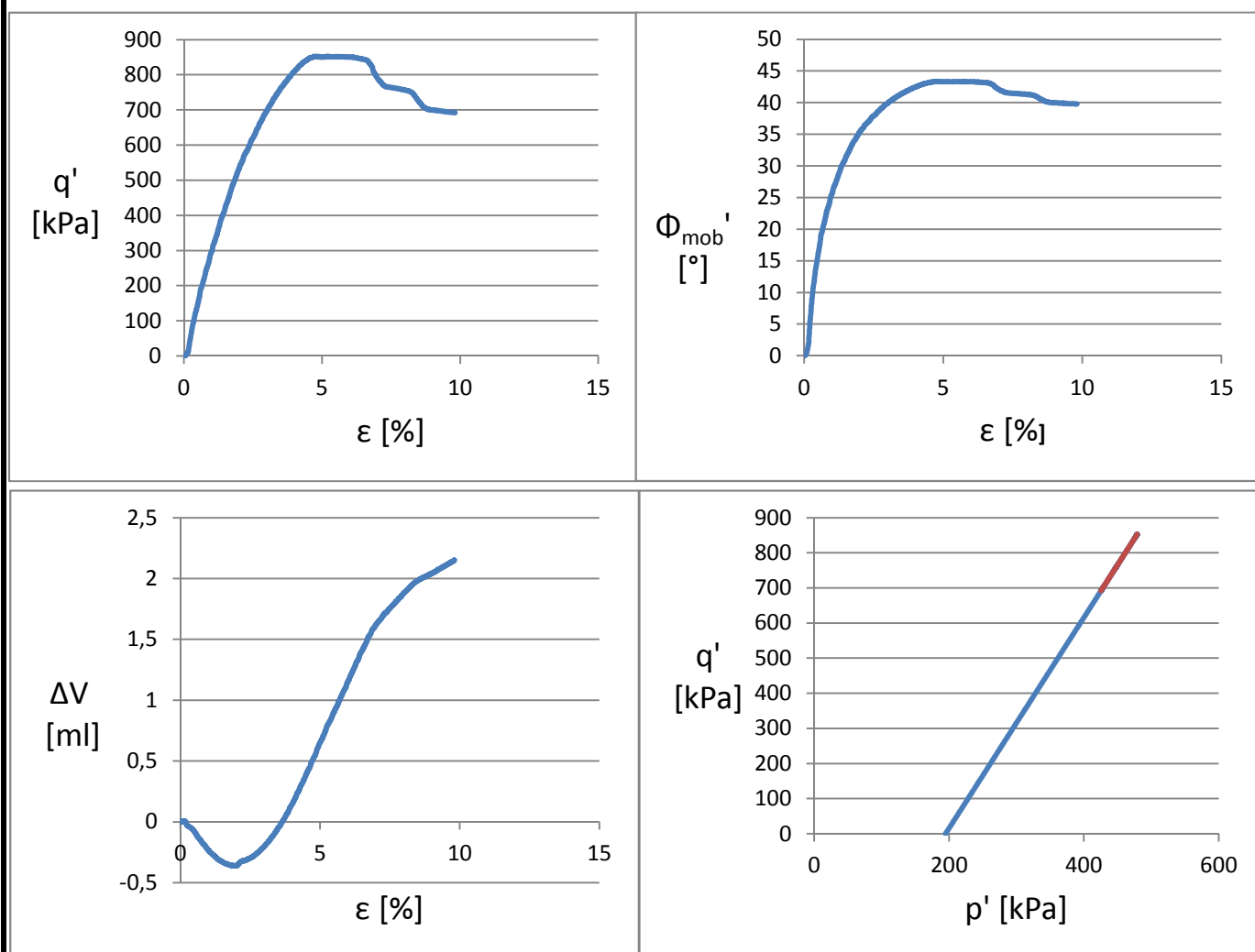
Vyhodnocení:

Interval napětí	$\sigma'_v$ [kPa]	0-50	50-100	100-300	300-800	800-1200
Edometrický modul	$E_{oed}$ [MPa]	<b>0,78</b>	<b>2,89</b>	<b>6,27</b>	<b>16,02</b>	<b>25,29</b>
Součinitel stlačitelnosti	$C =$	<b>35,587</b>		-		
Index stlačitelnosti	$C_c =$	<b>0,1424</b>		-		
Index stlačitelnosti pro odelhčení	$C_s =$	<b>0,01</b>		-		
	$\lambda =$	<b>0,0618</b>		-		
	$\kappa =$	<b>0,00434</b>		-		

## Příloha 3.1. Protokol o odvodněné triaxiální zkoušce

Název vzorku	<b>B2 30,0 - 31,0</b>		Datum	19.4.2016	
			Zkoušku provedl	Marek Bartoň	
tlak v komoře	400	kPa	tlak ve vzorku	200	kPa
Počáteční číslo pórovitosti	$e_0 = 0,600$	-	Stanovení součinitele propustnosti		
Kritické číslo pórovitosti	$e_{cr} = 0,639$	-	změřený objem vody	Q = 4,8	ml
Úhel vnitřního tření vrcholový	$\Phi_{vr} = 43,3$	°	doba měření	t = 337	s
Úhel vnitřního tření kritický	$\Phi_{cr} = 39,8$	°	plocha vzorku	A = 11,55	cm <sup>2</sup>
			hydraulický gradient	i = 38,87	-
			součinitel propustnosti	k = <b>3,2E-07</b>	m/s

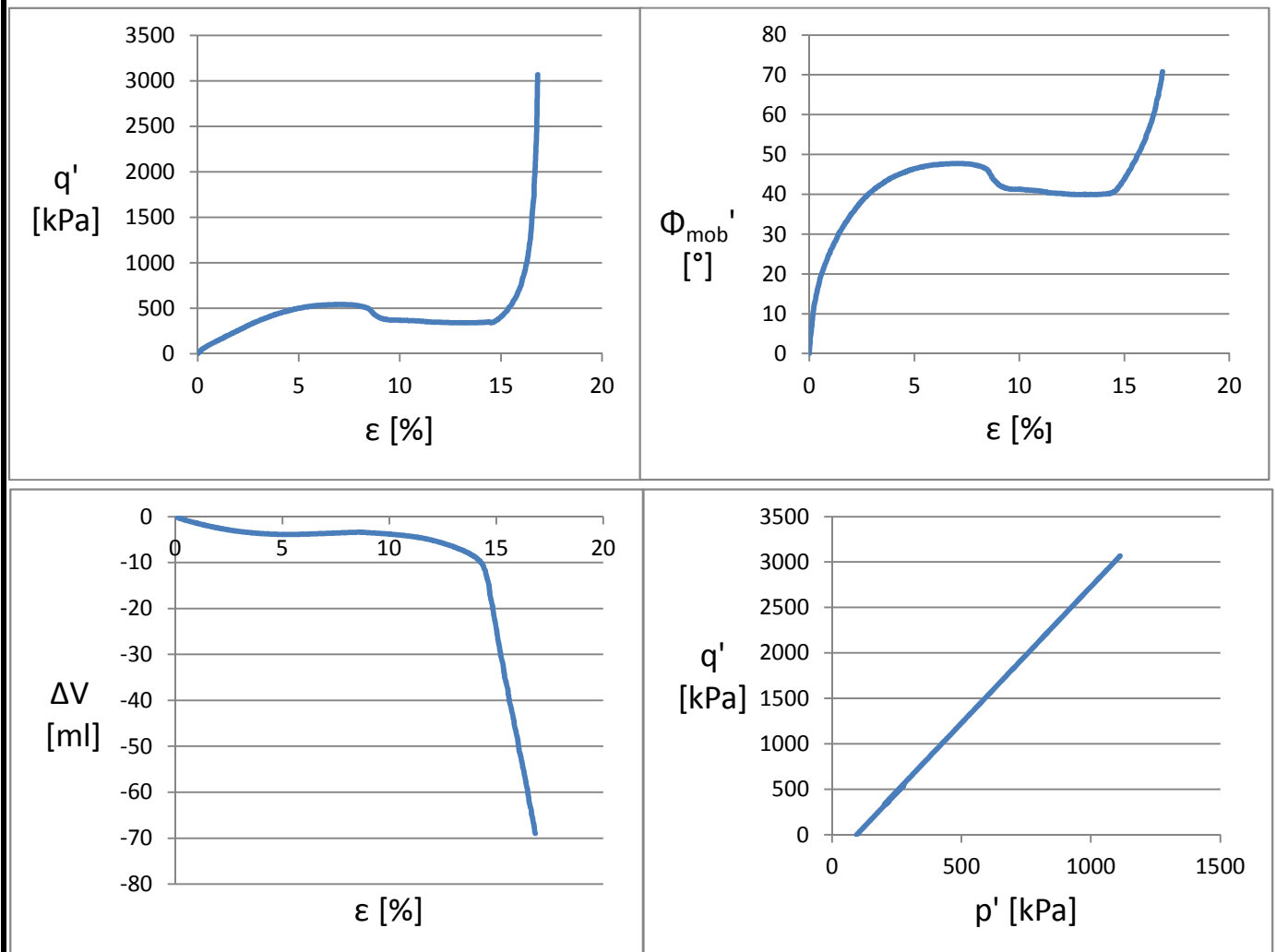
Průběh zkoušky:



## Příloha 3.2.: Protokol o odvodněné triaxiální zkoušce

Název vzorku	<b>B3 52,0 - 52,5</b>		Datum	26.4.2016	
			Zkoušku provedl	Marek Bartoň	
Tlak v komoře	200	kPa	Tlak ve vzorku	100	kPa
Počáteční číslo pórovitosti	$e_0 =$ <b>0,701</b>	-	Stanovení součinitele propustnosti		
Kritické číslo pórovitosti	$e_{cr} =$ <b>0,701</b>	-	změřený objem vody	Q =	87,264 ml
Úhel vnitřního tření vrcholový	$\Phi_{vr} =$ <b>70,8</b>	°	doba měření	t =	67200 s
Úhel vnitřního tření kritický	$\Phi_{cr} =$ <b>70,8</b>	°	plocha vzorku	A =	10,65 cm <sup>2</sup>
			hydraulický gradient	i =	42,27 -
			součinitel propustnosti	k =	<b>2,9E-08</b> m/s

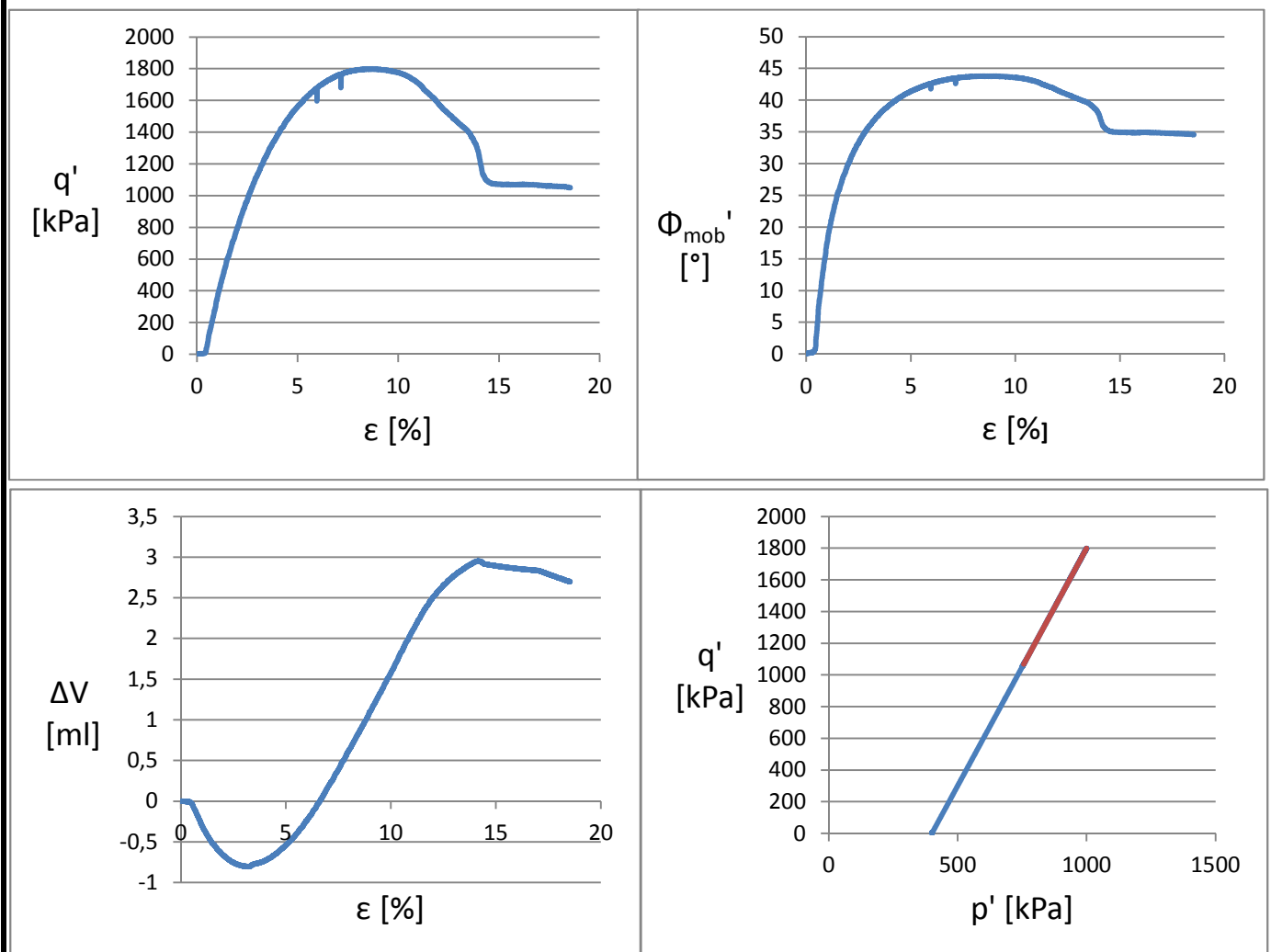
Průběh zkoušky:



### Příloha 3.3.: Protokol o odvodněné triaxiální zkoušce

Název vzorku	<b>B3 52,0 - 52,5</b>		Datum	19.4.2016	
			Zkoušku provedl	Marek Bartoň	
Tlak v komoře	700	kPa	Tlak ve vzorku	300	kPa
Počáteční číslo pórovitosti	$e_0 =$ <b>0,530</b>	-	Stanovení součinitele propustnosti		
Kritické číslo pórovitosti	$e_{cr} =$ <b>0,584</b>	-	změřený objem vody	Q = 25,2	ml
Úhel vnitřního tření vrcholový	$\Phi_{vr} =$ <b>43,8</b>	°	doba měření	t = 702	s
Úhel vnitřního tření kritický	$\Phi_{cr} =$ <b>34,9</b>	°	plocha vzorku	A = 11,46	cm <sup>2</sup>
			hydraulický gradient	i = 41,25	-
			součinitel propustnosti	k = <b>7,6E-07</b>	m/s

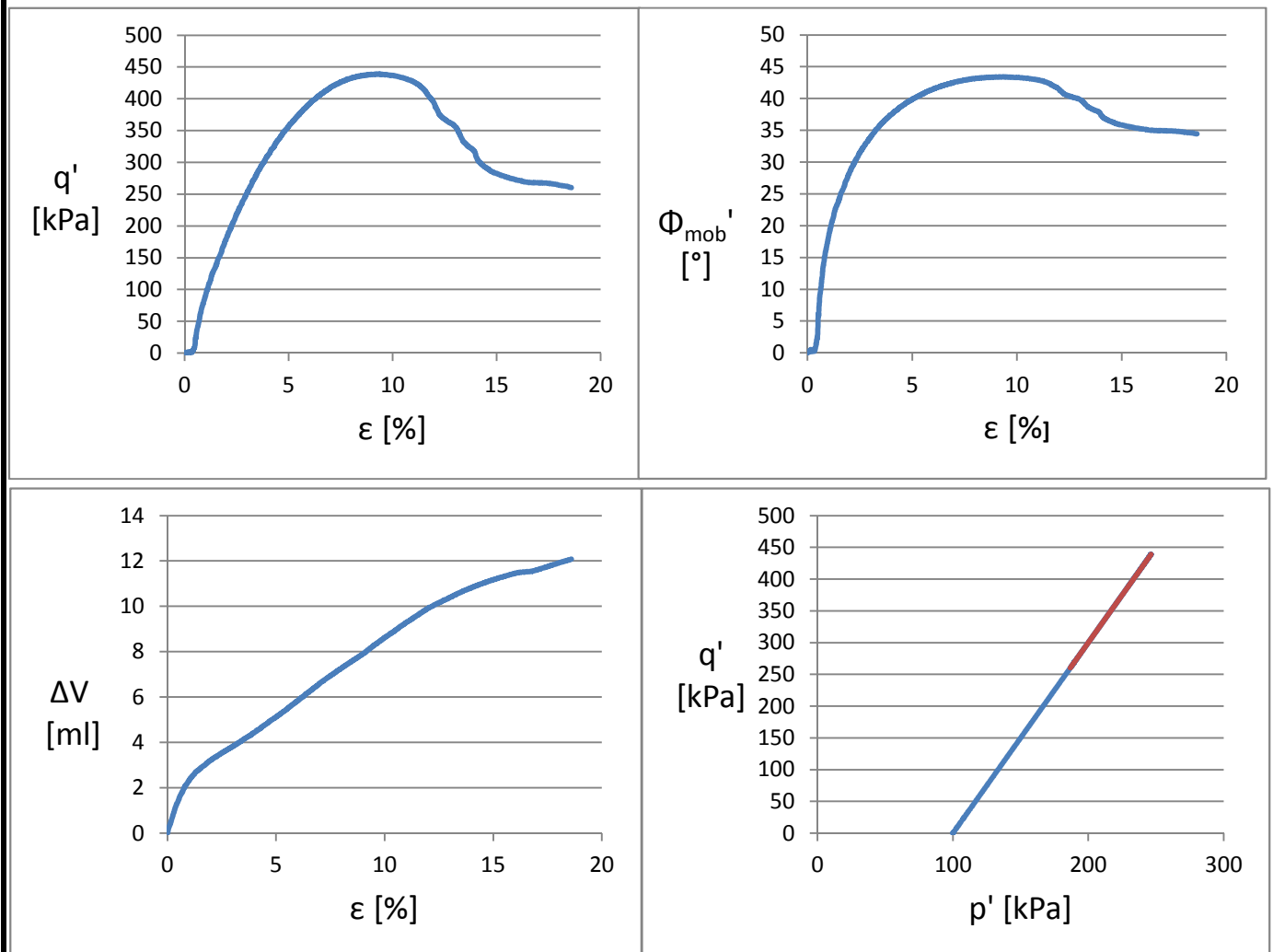
Průběh zkoušky:



## Příloha 3.4.: Protokol o odvodněné triaxiální zkoušce

Název vzorku	<b>B3 65,5 - 65,9</b>			Datum	25.4.2016		
				Zkoušku provedl	Marek Bartoň		
tlak v komoře	200	kPa	tlak ve vzorku	100	kPa		
Počáteční číslo pórovitosti	$e_0 =$	<b>0,552</b>	-	Stanovení součinitele propustnosti			
Kritické číslo pórovitosti	$e_{cr} =$	<b>0,816</b>	-	změřený objem vody	Q =	7,948	ml
Úhel vnitřního tření vrcholový	$\Phi_{vr} =$	<b>43,4</b>	°	doba měření	t =	25260	s
Úhel vnitřního tření kritický	$\Phi_{cr} =$	<b>34,4</b>	°	plocha vzorku	A =	10,29	cm <sup>2</sup>
				hydraulický gradient	i =	43,53	-
				součinitel propustnosti	k =	<b>7,0E-09</b>	m/s

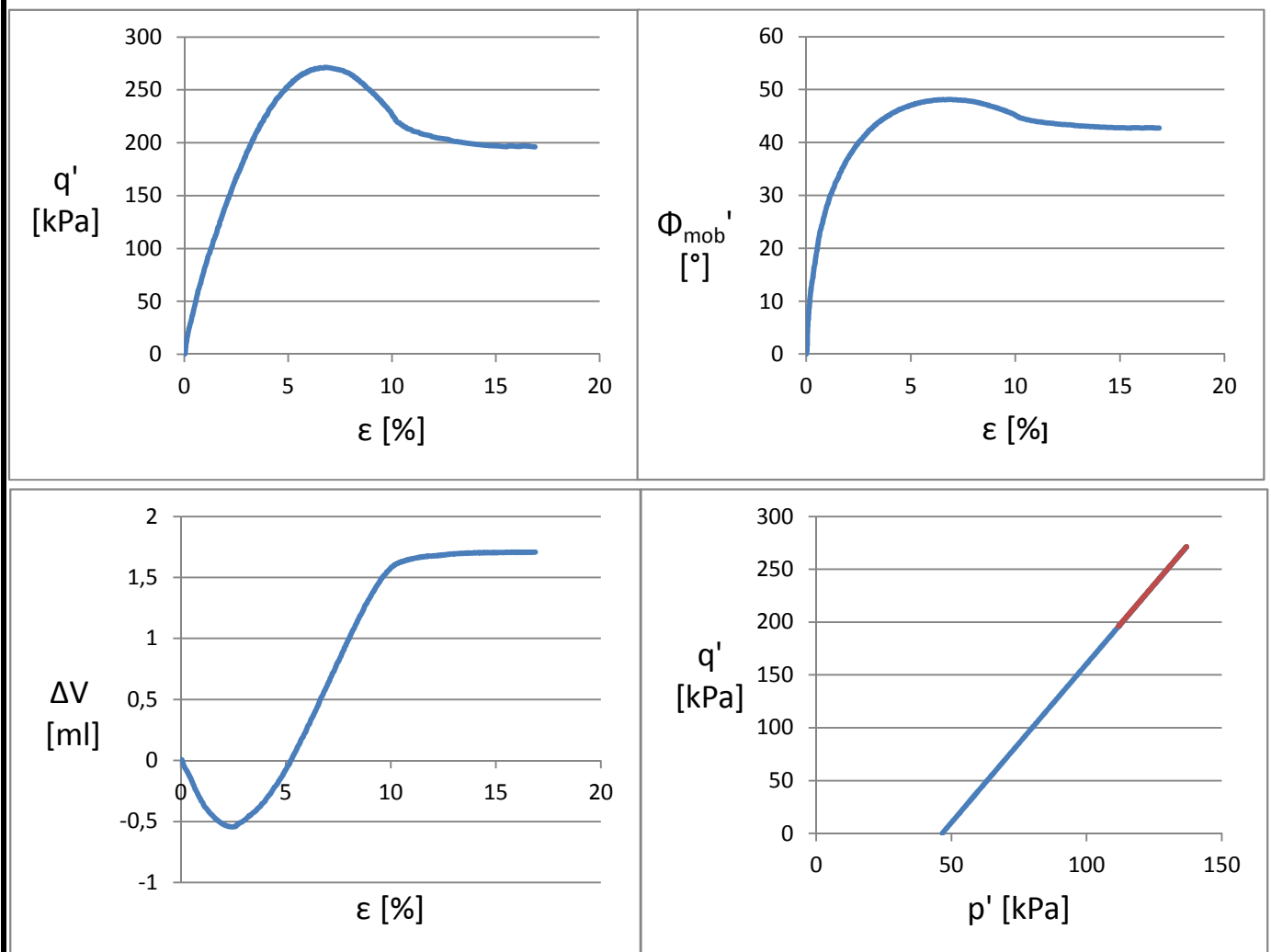
Průběh zkoušky:



## Příloha 3.5.: Protokol o odvodněné triaxiální zkoušce

Název vzorku	<b>B4 0,0 - 1,5</b>		Datum	28.4.2016	
			Zkoušku provedl	Marek Bartoň	
tlak v komoře	100	kPa	tlak ve vzorku	50	kPa
Počáteční číslo pórovitosti	$e_0 =$	<b>0,511</b>	Stanovení součinitele propustnosti		
Kritické číslo pórovitosti	$e_{cr} =$	<b>0,548</b>	změřený objem vody	Q =	4,8 ml
Úhel vnitřního tření vrcholový	$\Phi_{vr} =$	<b>48,1</b>	°	doba měření	t = 337 s
Úhel vnitřního tření kritický	$\Phi_{cr} =$	<b>42,7</b>	°	plocha vzorku	A = 10,02 cm <sup>2</sup>
			hydraulický gradient	i =	42,19 -
			součinitel propustnosti	k =	<b>3,4E-07</b> m/s

Průběh zkoušky:

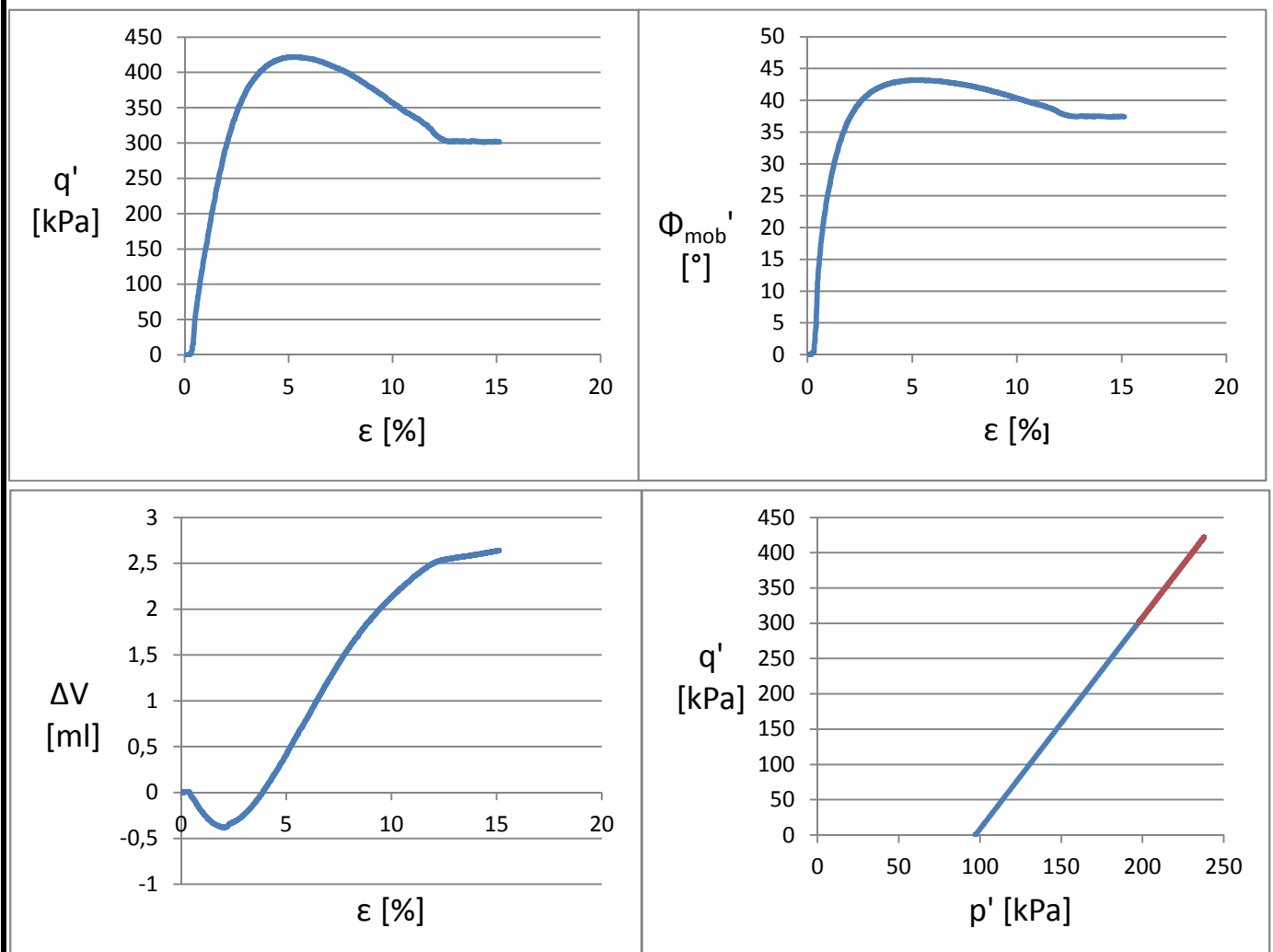




## Příloha 3.6.: Protokol o odvodněné triaxiální zkoušce

Název vzorku	<b>B2 0,0 - 1,5</b>		Datum	19.4.2016	
			Zkoušku provedl	Marek Bartoň	
Tlak v komoře	200	kPa	Tlak ve vzorku	100	kPa
Počáteční číslo pórovitosti	$e_0 =$ <b>0,669</b>	-	Stanovení součinitele propustnosti		
Kritické číslo pórovitosti	$e_{cr} =$ <b>0,721</b>	-	změřený objem vody	Q = 27,1	ml
Úhel vnitřního tření vrcholový	$\Phi_{vr} =$ <b>43,2</b>	°	doba měření	t = 621	s
Úhel vnitřního tření kritický	$\Phi_{cr} =$ <b>37,4</b>	°	plocha vzorku	A = 11,70	cm <sup>2</sup>
			hydraulický gradient	i = 41,10	-
			součinitel propustnosti	k = <b>9,1E-07</b>	m/s

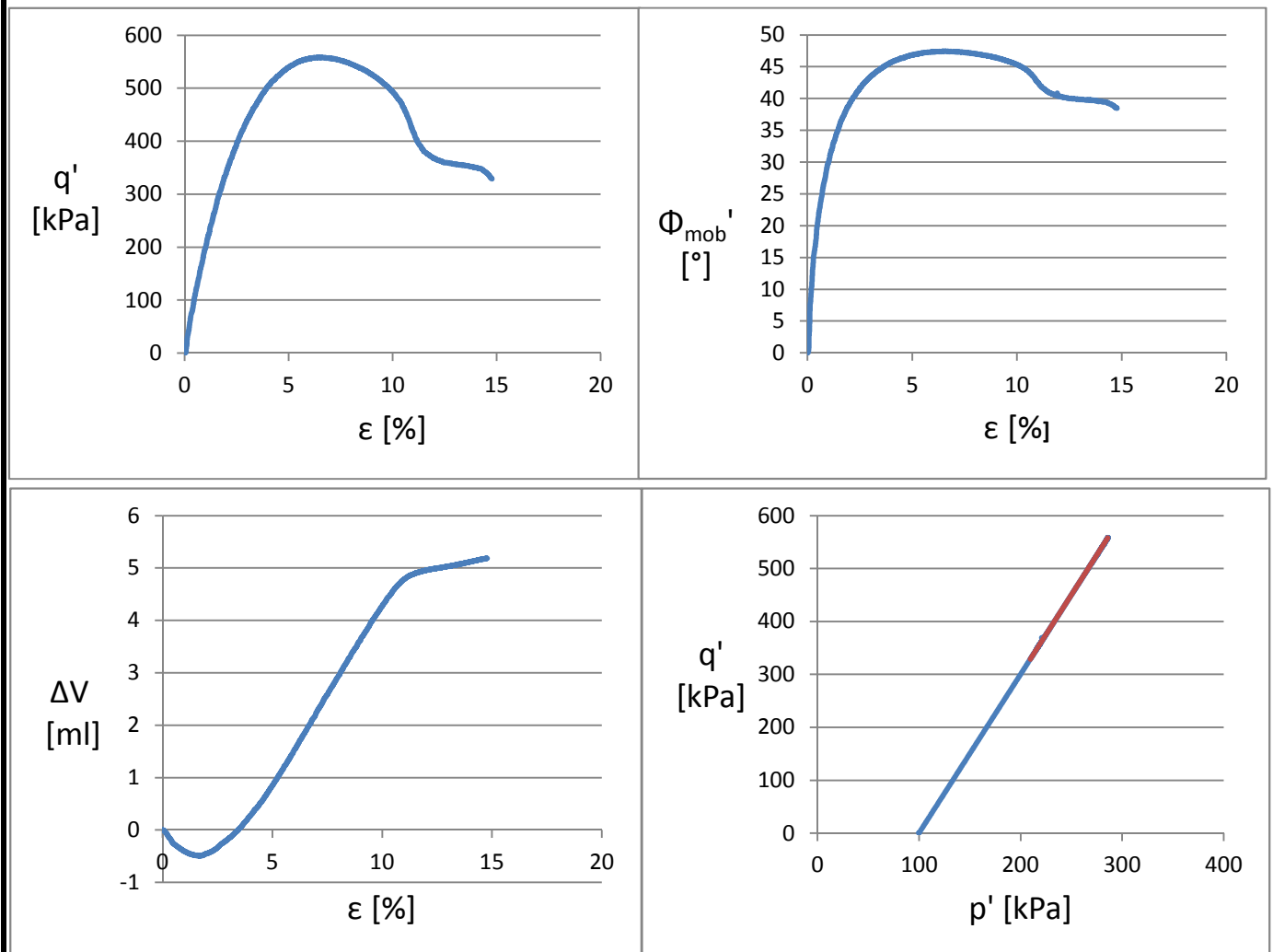
Průběh zkoušky:



## Příloha 3.7.: Protokol o odvodněné triaxiální zkoušce

Název vzorku	<b>B4 22,1 - 22,5</b>		Datum	13.4.2016	
			Zkoušku provedl	Marek Bartoň	
tlak v komoře	200	kPa	tlak ve vzorku	100	kPa
Počáteční číslo pórovitosti	$e_0 =$	<b>0,585</b>	Stanovení součinitele propustnosti		
Kritické číslo pórovitosti	$e_{cr} =$	<b>0,682</b>	změřený objem vody	Q =	7,6 ml
Úhel vnitřního tření vrcholový	$\Phi_{vr} =$	<b>47,4</b>	°	doba měření	t = 616 s
Úhel vnitřního tření kritický	$\Phi_{cr} =$	<b>38,5</b>	°	plocha vzorku	A = 11,40 cm <sup>2</sup>
			hydraulický gradient	i =	40,50 -
			součinitel propustnosti	k =	<b>2,7E-07</b> m/s

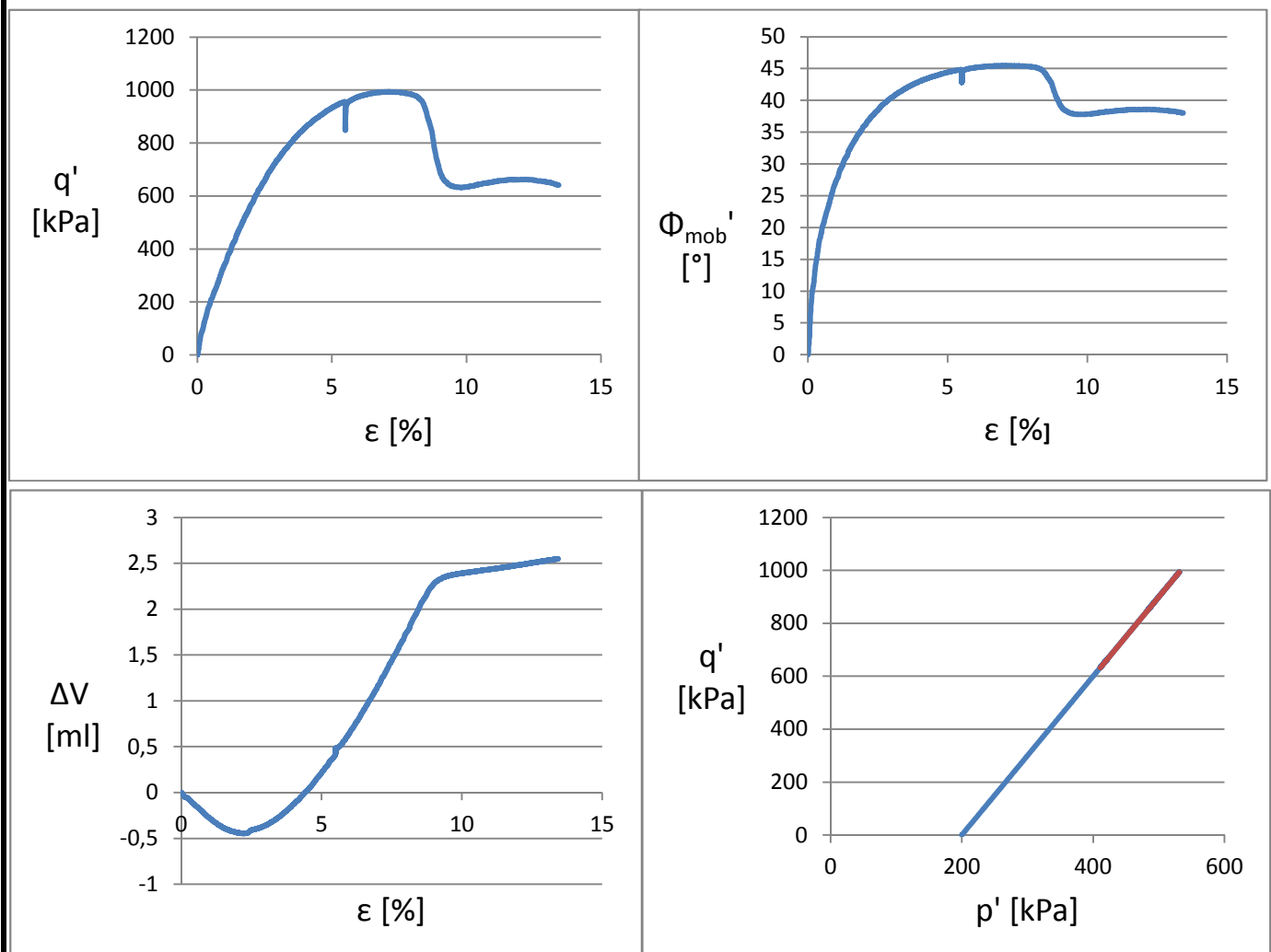
Průběh zkoušky:



## Příloha 3.8.: Protokol o odvodněné triaxiální zkoušce

Název vzorku	<b>B4 22,1 - 22,5</b>		Datum	15.4.2016	
			Zkoušku provedl	Marek Bartoň	
tlak v komoře	400	kPa	tlak ve vzorku	200	kPa
Počáteční číslo pórovitosti	$e_0 = 0,464$	-	Stanovení součinitele propustnosti		
Kritické číslo pórovitosti	$e_{cr} = 0,514$	-	změřený objem vody	Q = 5,79	ml
Úhel vnitřního tření vrcholový	$\Phi_{vr} = 45,5$	°	doba měření	t = 996	s
Úhel vnitřního tření kritický	$\Phi_{cr} = 37,8$	°	plocha vzorku	A = 10,47	cm <sup>2</sup>
			hydraulický gradient	i = 41,54	-
			součinitel propustnosti	k = <b>1,3E-07</b>	m/s

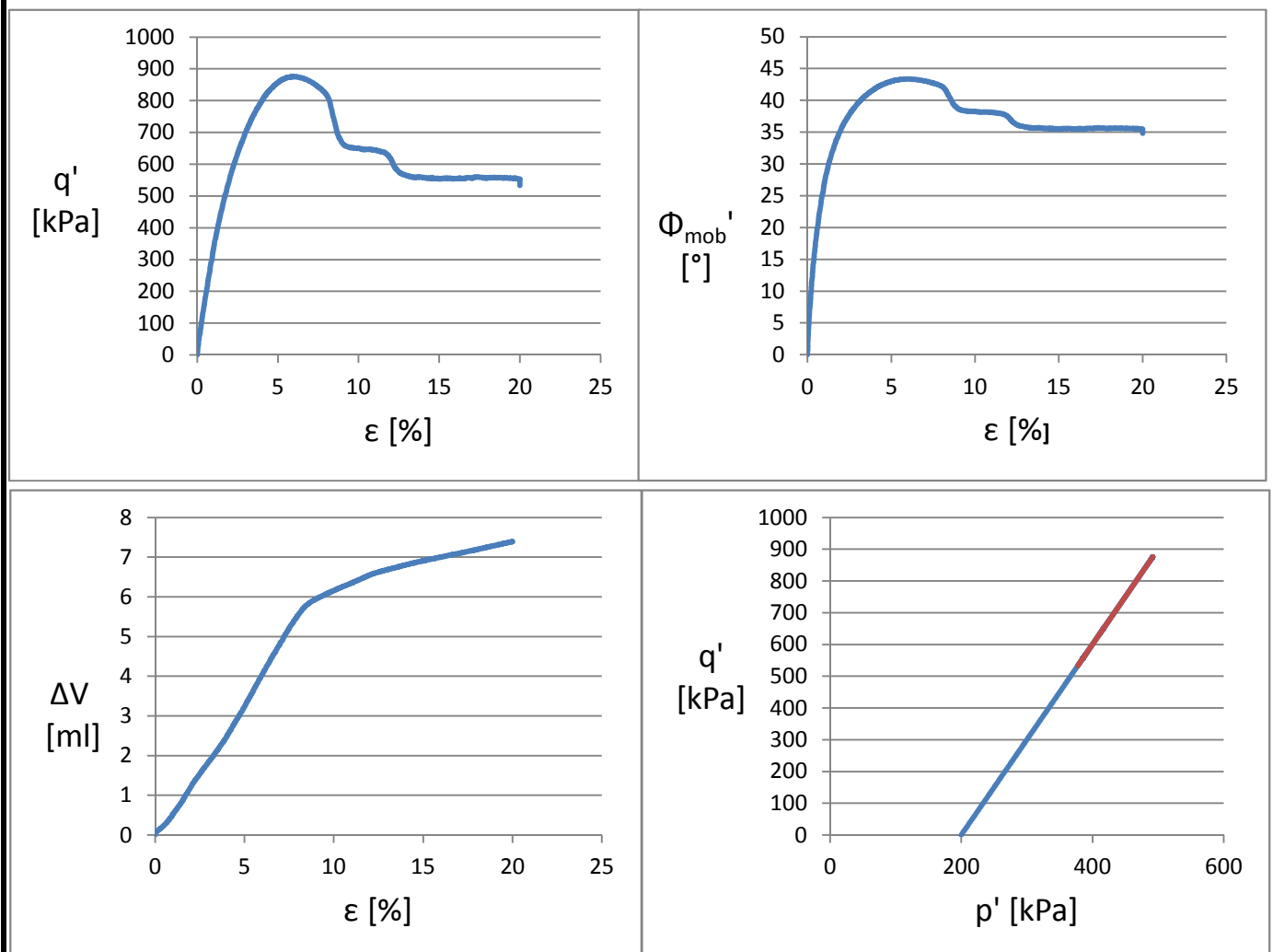
Průběh zkoušky:



## Příloha 3.9.: Protokol o odvodněné triaxiální zkoušce

Název vzorku	<b>B5 8,0 - 11,0</b>		Datum	29.4.2016	
			Zkoušku provedl	Marek Bartoň	
tlak v komoře	400	kPa	tlak ve vzorku	200	kPa
Počáteční číslo pórovitosti	$e_0 = 0,686$	-	Stanovení součinitele propustnosti		
Kritické číslo pórovitosti	$e_{cr} = 0,825$	-	změřený objem vody	Q = 66,147	ml
Úhel vnitřního tření vrcholový	$\Phi_{vr} = 43,4$	°	doba měření	t = 7440	s
Úhel vnitřního tření kritický	$\Phi_{cr} = 34,8$	°	plocha vzorku	A = 11,49	cm <sup>2</sup>
			hydraulický gradient	i = 38,38	-
			součinitel propustnosti	k = 2,0E-07	m/s

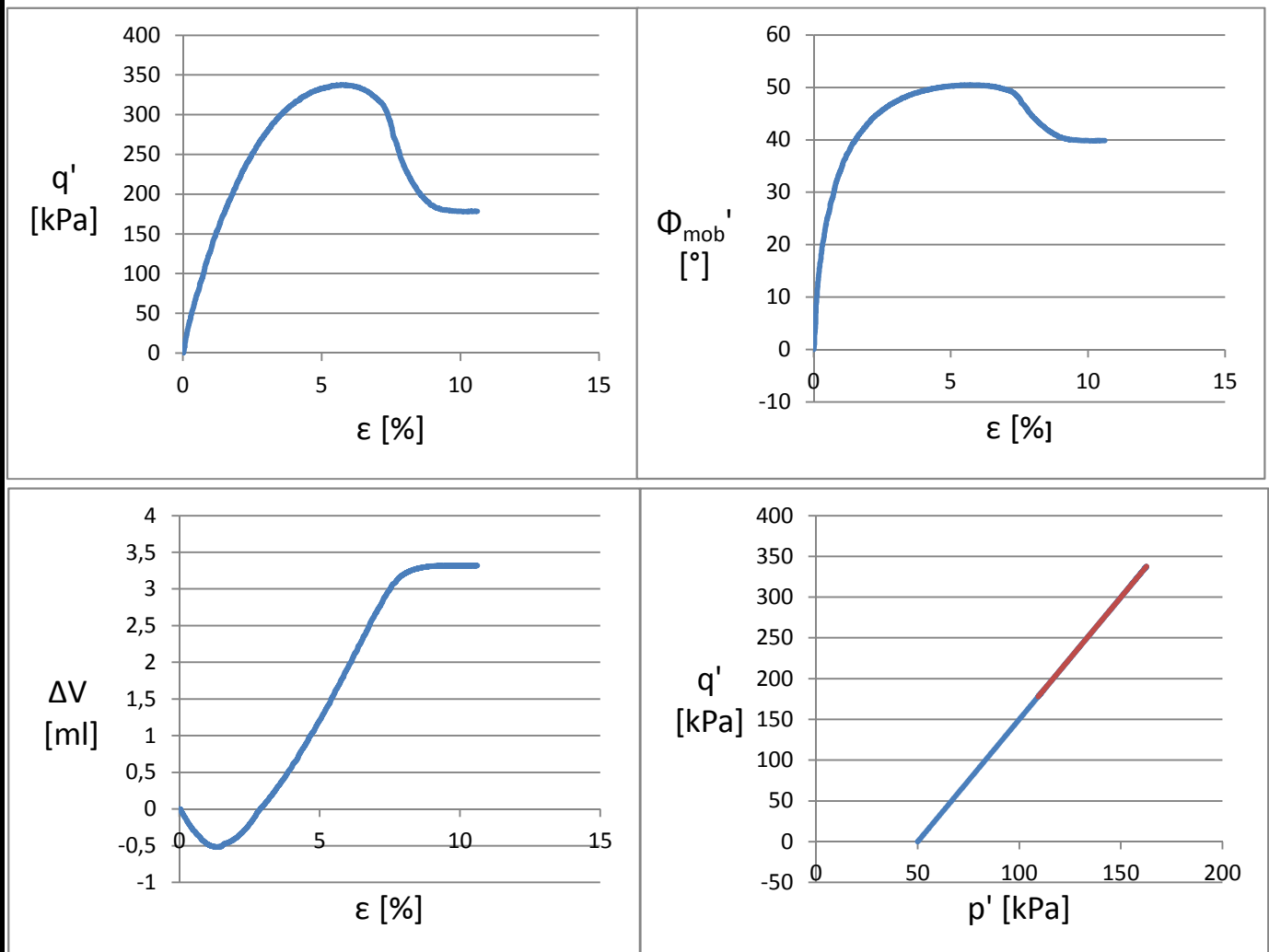
Průběh zkoušky:



## Příloha 3.10.: Protokol o odvodněné triaxiální zkoušce

Název vzorku	<b>B5 35,6 - 35,9</b>		Datum	15.4.2016	
			Zkoušku provedl	Marek Bartoň	
tlak v komoře	100	kPa	tlak ve vzorku	50	kPa
Počáteční číslo pórovitosti	$e_0 =$	<b>0,622</b>	Stanovení součinitele propustnosti		
Kritické číslo pórovitosti	$e_{cr} =$	<b>0,691</b>	změřený objem vody	$Q =$	31,1 ml
Úhel vnitřního tření vrcholový	$\Phi_{vr} =$	<b>50,5</b>	°	doba měření	$t =$ 756 s
Úhel vnitřního tření kritický	$\Phi_{cr} =$	<b>39,8</b>	°	plocha vzorku	$A =$ 10,91 cm <sup>2</sup>
			hydraulický gradient	$i =$	41,63 -
			součinitel propustnosti	$k =$	<b>9,1E-07</b> m/s

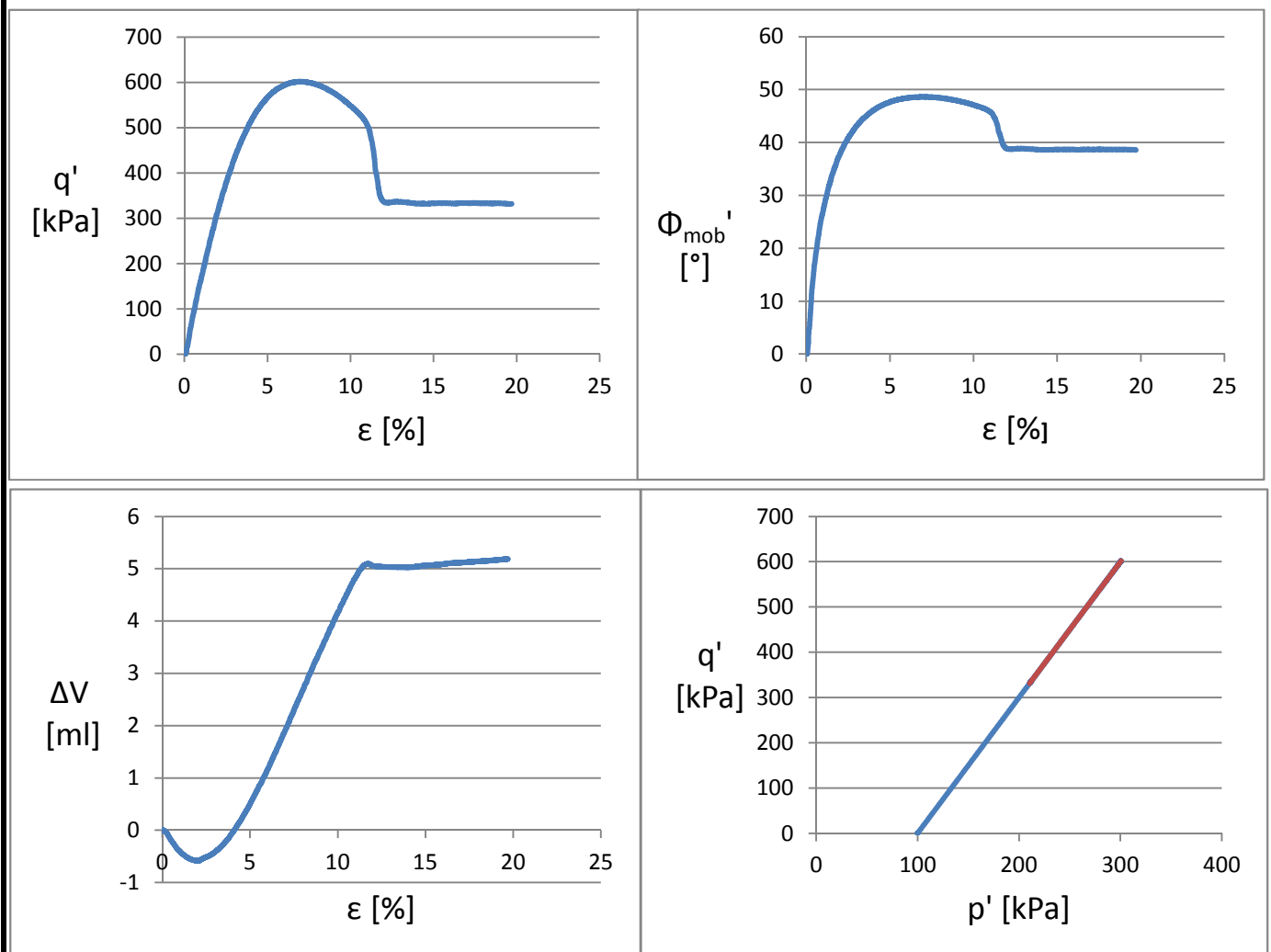
Průběh zkoušky:



## Příloha 3.11.: Protokol o odvodněné triaxiální zkoušce

Název vzorku	<b>B5 35,6 - 35,9</b>		Datum	15.4.2016	
			Zkoušku provedl	Marek Bartoň	
Tlak v komoře	200	kPa	Tlak ve vzorku	100	kPa
Počáteční číslo pórovitosti	$e_0 =$ <b>0,573</b>	-	Stanovení součinitele propustnosti		
Kritické číslo pórovitosti	$e_{cr} =$ <b>0,671</b>	-	změřený objem vody	Q = 18	ml
Úhel vnitřního tření vrcholový	$\Phi_{vr} =$ <b>48,6</b>	°	doba měření	t = 428	s
Úhel vnitřního tření kritický	$\Phi_{cr} =$ <b>38,6</b>	°	plocha vzorku	A = 11,17	cm <sup>2</sup>
			hydraulický gradient	i = 39,99	-
			součinitel propustnosti	k = <b>9,4E-07</b>	m/s

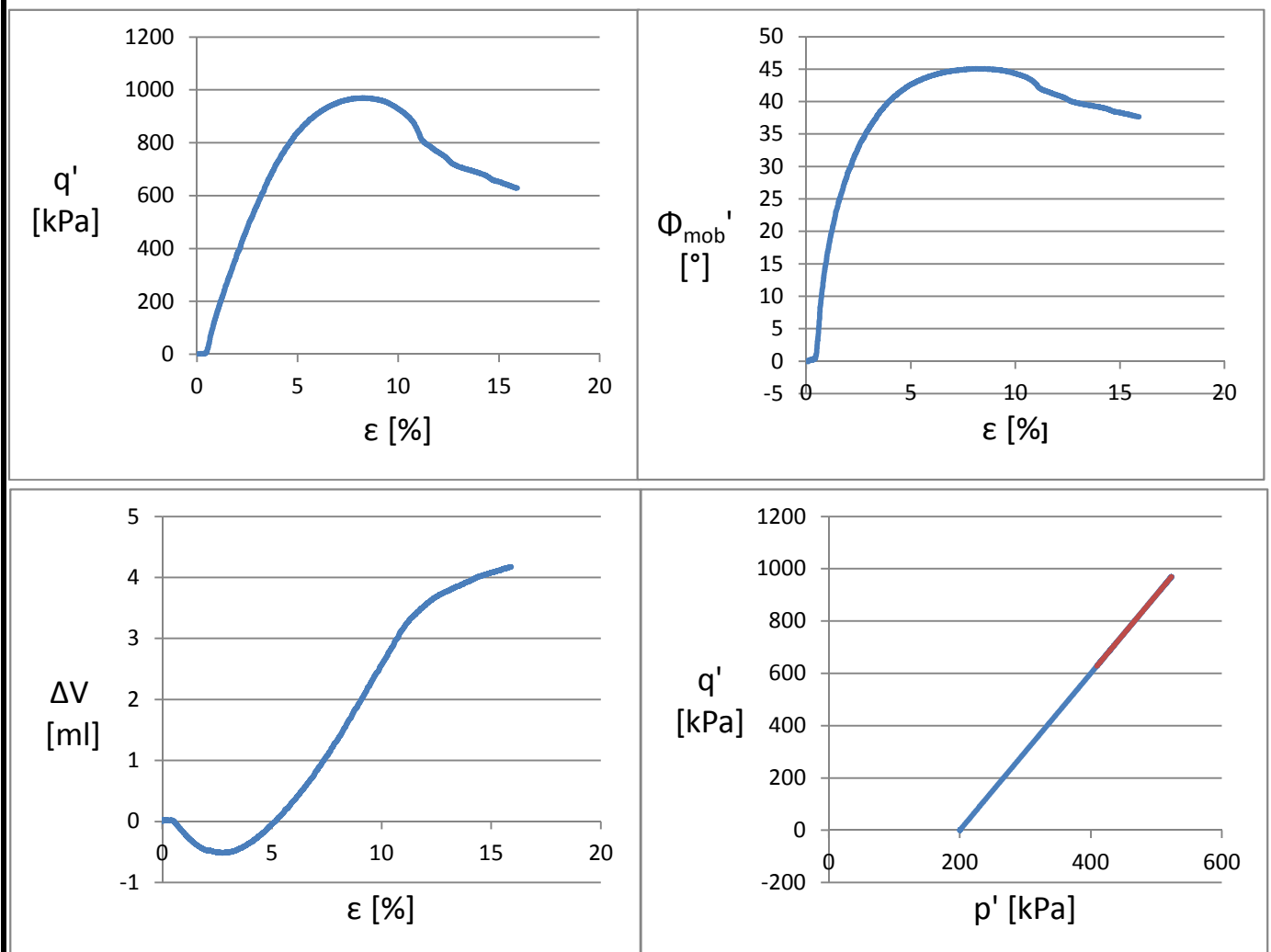
Průběh zkoušky:



## Příloha 3.12.: Protokol o odvodněné triaxiální zkoušce

Název vzorku	<b>B5 35,6 - 35,9</b>			Datum	18.4.2016		
				Zkoušku provedl	Marek Bartoň		
tlak v komoře	400	kPa	tlak ve vzorku	200	kPa		
Počáteční číslo pórovitosti	$e_0 =$	<b>0,471</b>	-	Stanovení součinitele propustnosti			
Kritické číslo pórovitosti	$e_{cr} =$	<b>0,552</b>	-	změřený objem vody	Q =	35,42	ml
Úhel vnitřního tření vrcholový	$\Phi_{vr} =$	<b>45,1</b>	°	doba měření	t =	7860	s
Úhel vnitřního tření kritický	$\Phi_{cr} =$	<b>37,7</b>	°	plocha vzorku	A =	10,87	cm <sup>2</sup>
				hydraulický gradient	i =	42,64	-
				součinitel propustnosti	k =	<b>9,7E-08</b>	m/s

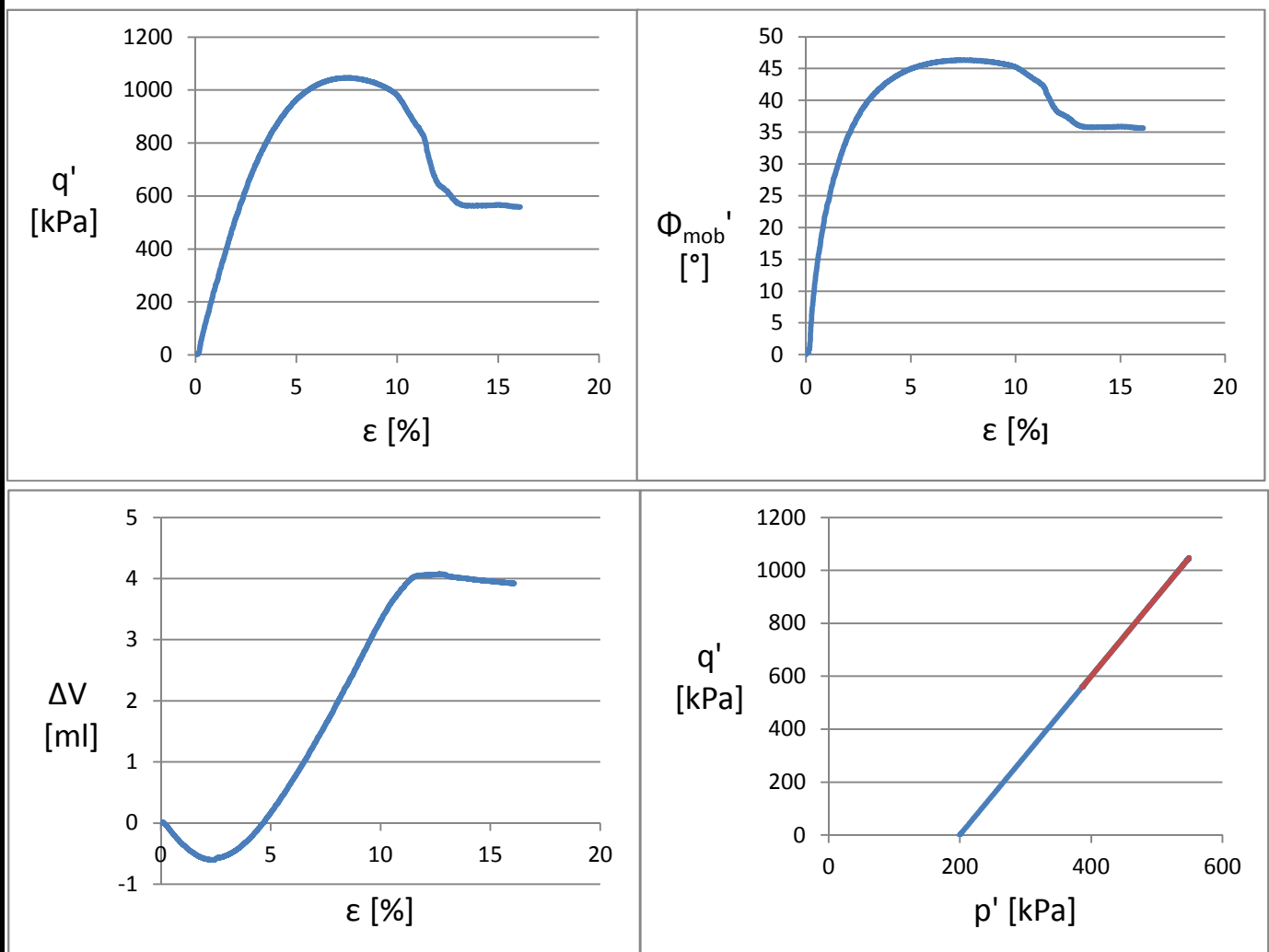
Průběh zkoušky:



## Příloha 3.13.: Protokol o odvodněné triaxiální zkoušce

Název vzorku	<b>B5 39,2 - 39,3</b>			Datum	24.4.2016		
				Zkoušku provedl	Marek Bartoň		
tlak v komoře	400	kPa	tlak ve vzorku	200	kPa		
Počáteční číslo pórovitosti	$e_0 = 0,659$	-	Stanovení součinitele propustnosti				
Kritické číslo pórovitosti	$e_{cr} = 0,737$	-	změřený objem vody	Q =	16,9	ml	
Úhel vnitřního tření vrcholový	$\Phi_{vr} = 46,3$	°	doba měření	t =	419	s	
Úhel vnitřního tření kritický	$\Phi_{cr} = 35,6$	°	plocha vzorku	A =	11,26	cm <sup>2</sup>	
			hydraulický gradient	i =	39,33	-	
			součinitel propustnosti	k =	<b>9,1E-07</b>	m/s	

Průběh zkoušky:

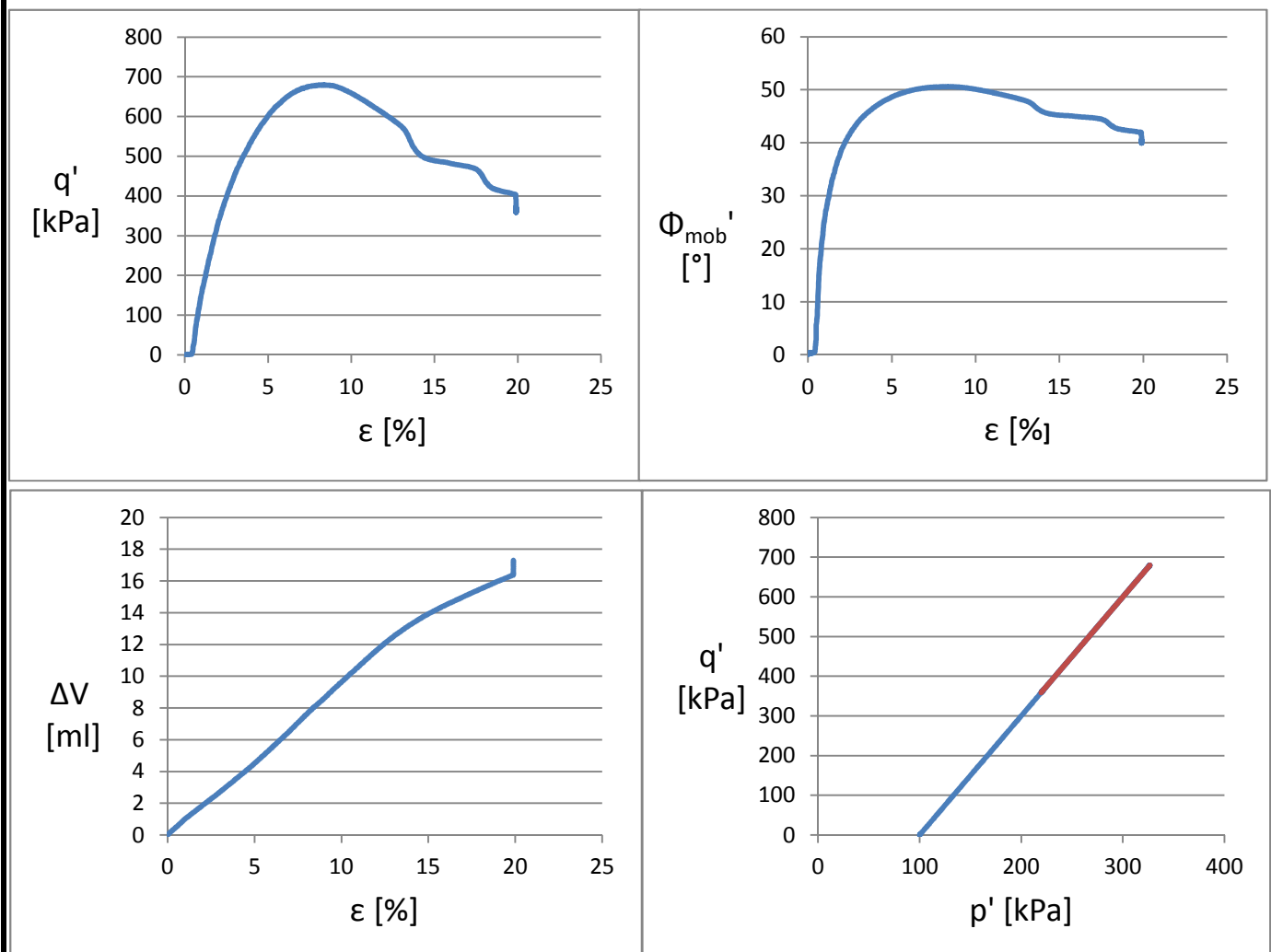




## Příloha 3.14.: Protokol o odvodněné triaxiální zkoušce

Název vzorku	<b>B5 39,3 - 39,4</b>		Datum	28.4.2016	
			Zkoušku provedl	Marek Bartoň	
tlak v komoře	200	kPa	tlak ve vzorku	100	kPa
Počáteční číslo pórovitosti	$e_0 =$	<b>0,760</b>	Stanovení součinitele propustnosti		
Kritické číslo pórovitosti	$e_{cr} =$	<b>1,101</b>	změřený objem vody	$Q =$	0,174 ml
Úhel vnitřního tření vrcholový	$\Phi_{vr} =$	<b>50,6</b>	°	doba měření	$t =$ 39600 s
Úhel vnitřního tření kritický	$\Phi_{cr} =$	<b>40,0</b>	°	plocha vzorku	$A =$ 11,33 cm <sup>2</sup>
			hydraulický gradient	$i =$	38,05 -
			součinitel propustnosti	$k =$	<b>1,0E-10</b> m/s

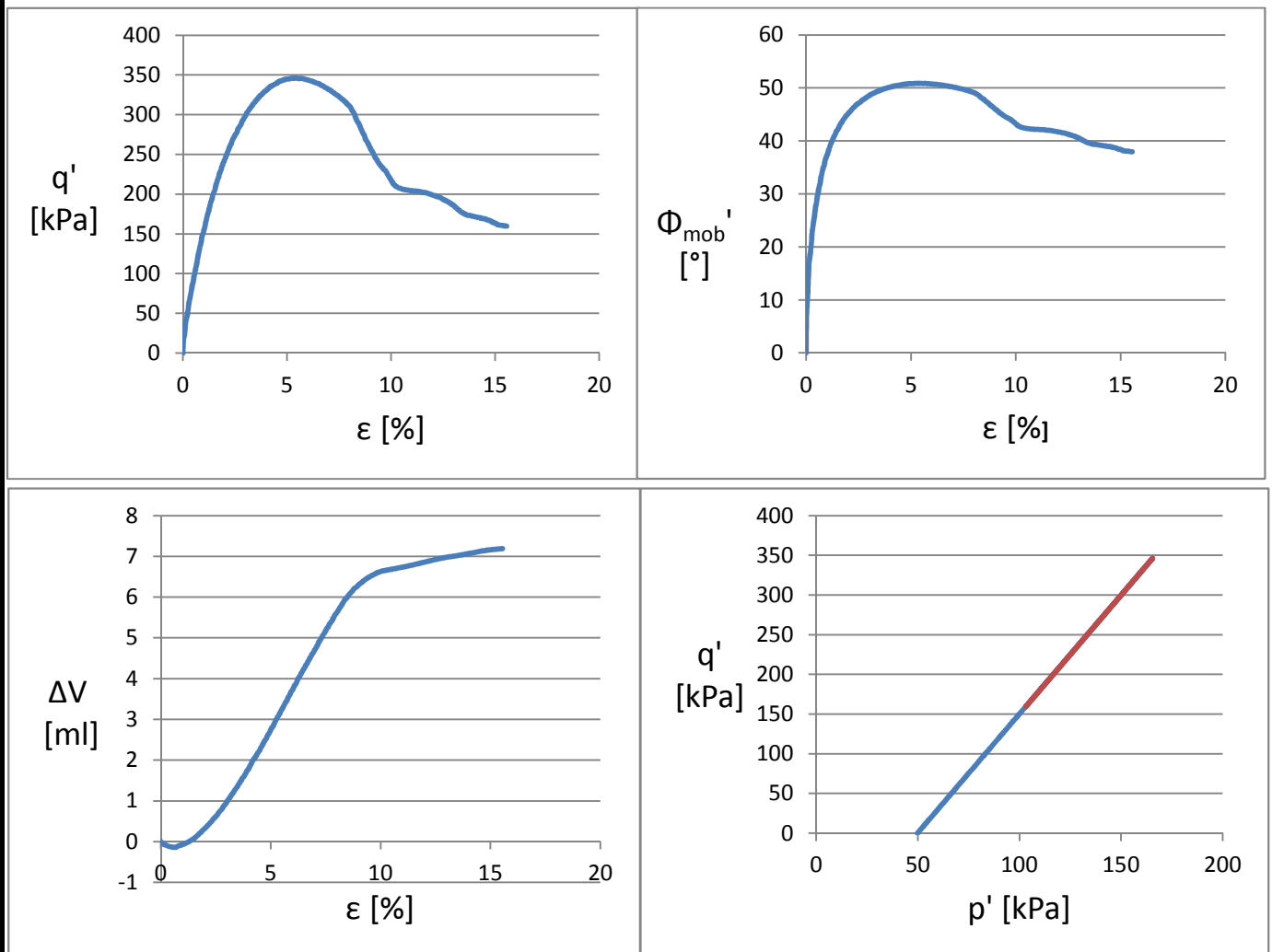
Průběh zkoušky:



## Příloha 3.15.: Protokol o odvodněné triaxiální zkoušce

Název vzorku	<b>B5 39,4 - 39,5</b>		Datum	29.4.2016	
			Zkoušku provedl	Marek Bartoň	
Tlak v komoře	100	kPa	Tlak ve vzorku	50	kPa
Počáteční číslo pórovitosti	$e_0 =$	<b>0,766</b>	Stanovení součinitele propustnosti		
Kritické číslo pórovitosti	$e_{cr} =$	<b>0,911</b>	změřený objem vody	Q =	25,6 ml
Úhel vnitřního tření vrcholový	$\Phi_{vr} =$	<b>50,9</b>	°	doba měření	t = 454 s
Úhel vnitřního tření kritický	$\Phi_{cr} =$	<b>38,0</b>	°	plocha vzorku	A = 11,47 cm <sup>2</sup>
			hydraulický gradient	i =	39,14 -
			součinitel propustnosti	k =	<b>1,3E-06</b> m/s

Průběh zkoušky:

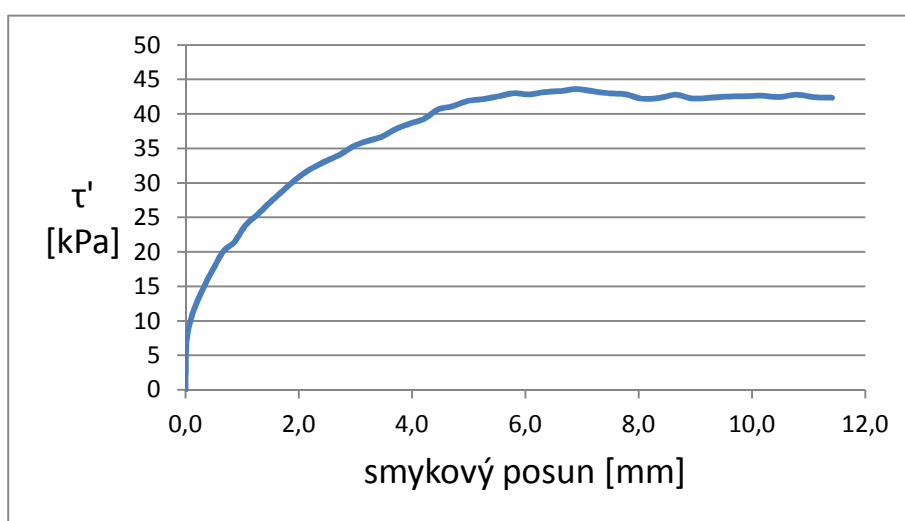


## Příloha 4. Protokol o krabicové smykové zkoušce

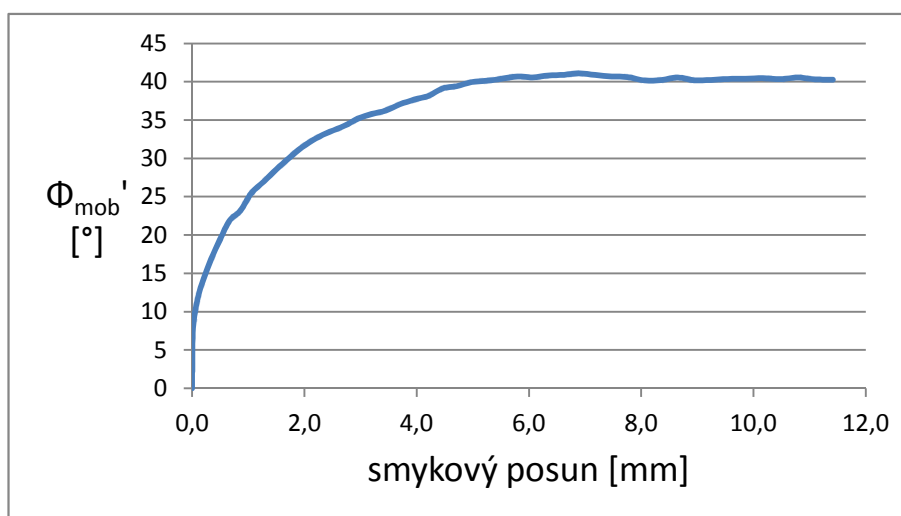
Název vzorku	<b>B6 26,7</b>	Datum	6.6.2016
		Zkoušku provedl	Marek Bartoň

svislé napětí	<b>50 kPa</b>	Úhel vnitřního tření vrcholový	<b>41,1</b> °
		Úhel vnitřního tření kritický	<b>40,3</b> °
		Plocha vzorku	7225 mm <sup>2</sup>

Průběh smykového napětí

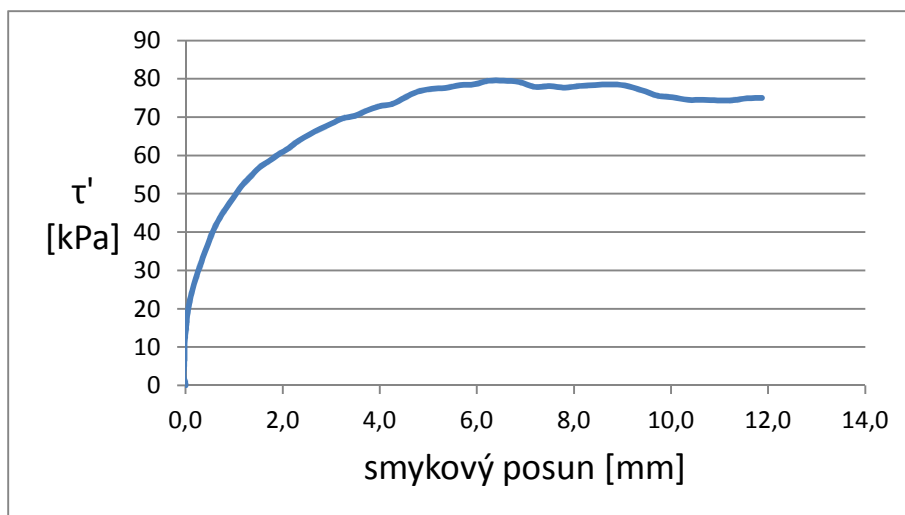


Průběh mobilizovaného úhlu vnitřního tření

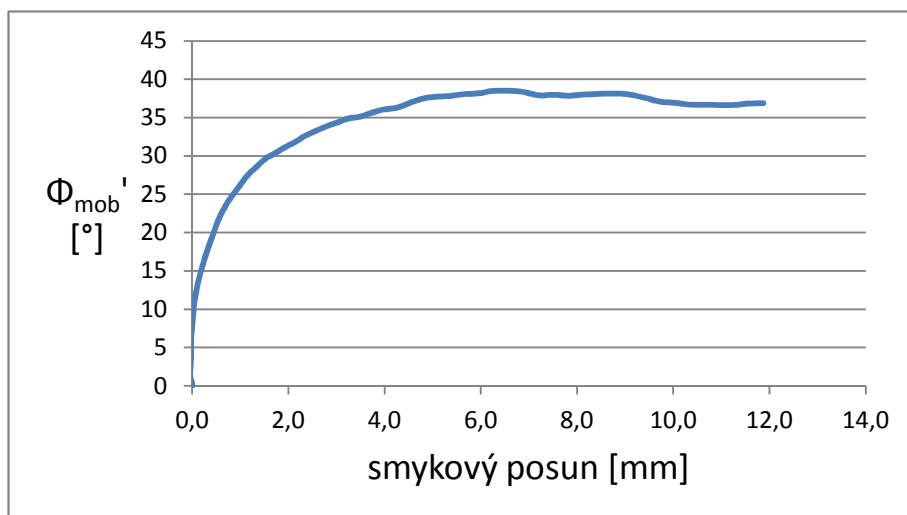


svislé napětí	100 kPa	Úhel vnitřního tření vrcholový	38,5°
		Úhel vnitřního tření kritický	36,9°
		Plocha vzorku	7225 mm <sup>2</sup>

Průběh smykového napětí

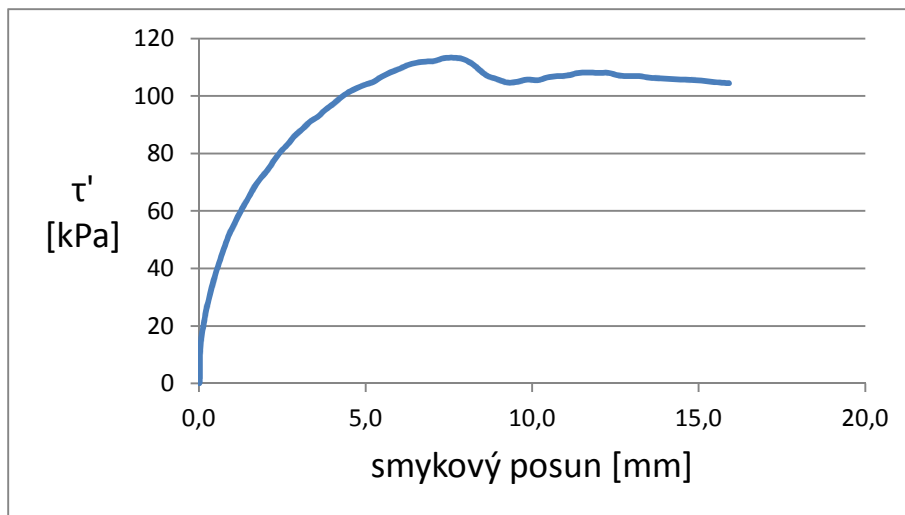


Průběh mobilizovaného úhlu vnitřního tření

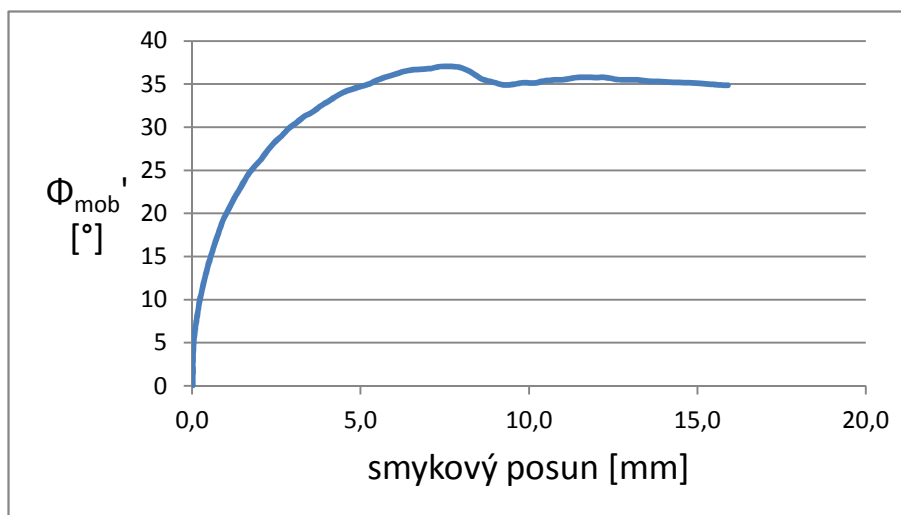


svislé napětí	150 kPa	Úhel vnitřního tření vrcholový	37,1°
		Úhel vnitřního tření kritický	34,8°
		Plocha vzorku	7225 mm <sup>2</sup>

Průběh smykového napětí

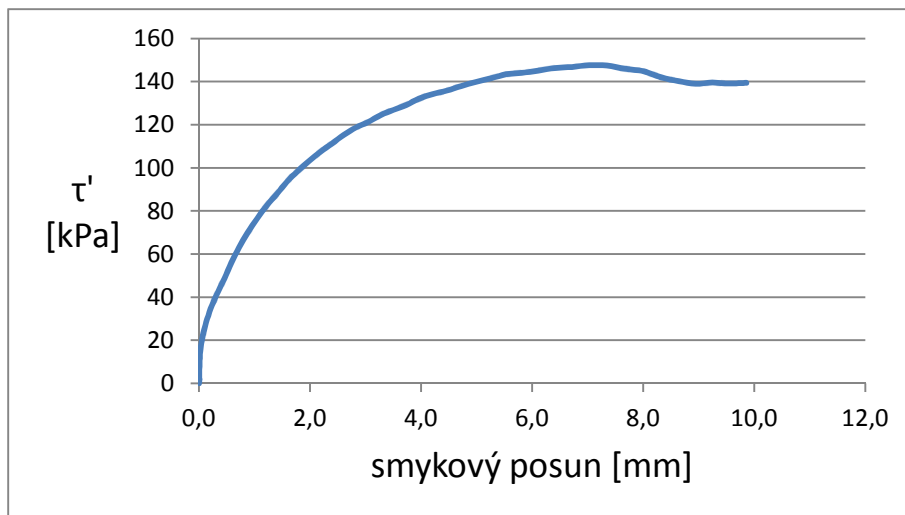


Průběh mobilizovaného úhlu vnitřního tření



svislé napětí	200 kPa	Úhel vnitřního tření vrcholový	36,4°
		Úhel vnitřního tření kritický	34,9°
		Plocha vzorku	7225 mm <sup>2</sup>

Průběh smykového napětí



Průběh mobilizovaného úhlu vnitřního tření

